

VŠB Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

Diagnostické metody a zkoušení dřevěných konstrukcí
Diagnostic methods and testing of timber construction

Student:

Bc. Leona Slívová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Veronika Franková

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího Ing. Veroniky Frankové a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek

V Ostravě

Anotace

Diplomová práce se zabývá zjišťováním mechanicko-fyzikálních vlastností dřeva, užívaného především ke konstrukčním účelům. Práce je zaměřena na dřevo jehličnatých dřevin a to konkrétně dřevo smrkové a borové. Cílem mé práce je zjistit vzájemné souvislosti mezi mechanicko-fyzikálními vlastnostmi konstrukčního dřeva. Mechanicko-fyzikální vlastnosti jsou zjišťovány pomocí různých diagnostických metod. Vzájemné souvislosti jsou vyjádřeny korelací mezi destruktivními a nedestruktivními nebo semidestruktivními metodami. Součástí práce je také vývoj nové semidestruktivní metody, která zkoumá tvrdost dřeva na základě jeho vrtatelnosti. Vyvíjená metoda je alternativou dnes běžně používané vpichové metody zjišťování tvrdosti dřeva. Vztah mezi tvrdostí a pevností dřeva je již dlouhou dobu znám, stále však chybí matematické vztahy pro vzájemný přepočet. Pomocí korelačních vztahů lze z výsledků nedestruktivních či semidestruktivních zkoušek orientačně stanovit pevnost v tlaku, pevnost v ohybu nebo modul pružnosti zkoušeného dřeva. Výsledky celé práce lze aplikovat a prakticky využít při stavebně technických průzkumech dřevostaveb, či historických staveb.

Anotation

The diploma work deals with the detection of mechanical-physical properties of timber used especially for construction purposes. The work is focused on softwood, namely pine and spruce wood. The goal of my work is to find related coherence among individual mechanical-physical properties of structural timber. Mechanical-physical properties are measured by using different diagnostic methods. The related coherence is expressed as correlations between destructive and nondestructive or semidestructiv methods. The work includes development of new semidestructive method which examines the hardness of the timber by his drilling. The developed method is the alternative method to penetration method for detecting hardness of timber, which is commonly used. The relationship between hardness and tensile strength of wood has been known for a long time but there are still missing the mathematical relations for the mutual conversion. With the help of the correlation relationship there can be determined the results of using the nondestructive or semidestructive testing that determine compressive strength, flexural strength or modulus of the elasticity of timber. The results of this thesis can be practically applied and used in the civil engineering surveys of wooden or historical building.

Obsah

Seznam použitého značení.....	8
1. Úvod	10
2. Vlastnosti dřeva.....	12
2.1. Vlastnosti vybraných dřevin.....	13
3. Výběr zkoušeného dřeva a vzorků, metodika zkoušení	15
3.1. Třídění dřeva podle pevnosti dle ČSN 73 2824-1	15
3.1.1. Popis posuzovaných znaků třídění jehličnatého řeziva.....	16
3.2. Metodika zkoušení	18
3.2.1. Dřevo suché - klimatizované	19
3.2.2. Dřevo cyklované – podrobené zetaření	19
3.2.3. Dřevo smrkové staré.....	21
4. Popis zkušebních metod.....	23
4.1. Zjištění základních fyzikálních vlastností	23
4.1.1. Stanovení hustoty dřeva dle ČSN EN 408.....	23
4.1.2. Stanovení vlhkosti dřeva váhovou metodou dle ČSN EN 13183-1	23
4.2. Nedestruktivní zkoušení	24
4.2.1. Ultrazvukové měření dřeva.....	24
4.3. Semidestruktivní zkoušení	26
4.3.1. Stanovení tvrdosti dřeva kladívkem Pilodyn	26
4.3.2. Stanovení tvrdosti dřeva v závislosti na jeho vrtatelnosti pomocí Kučerovy vrtačky	27
4.4. Destruktivní zkoušení.....	30
4.4.1 Stanovení pevnosti v ohybu dle ČSN EN 408	30
4.4.2. Stanovení globálního modulu pružnosti dle ČSN EN 408	32
4.4.3. Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny dle ČSN EN 408	32
4.5. Stanovení charakteristických hodnot a přepočet na 12% vlhkost.....	35
5. Statistické vyhodnocení výsledků a zjišťování závislostí.....	37
5.1. Statistické metody aplikované při hledání závislostí mezi zjištěnými vlastnostmi dřeva	37
5.2. Metodika hodnocení výsledků.....	39
5.3. Sestavení převodních tabulek	47
5.4. Doporučený postup zkoušení semidestruktivní metodou pomocí Kučerovy vrtačky.....	53
5.4.1. Postup provádění měření	53
5.4.2. Postup vyhodnocení měření.....	54
6. Závěr	55
Seznam použité literatury.....	57

Seznam použitých norem.....	57
Seznam použitých internetových odkazů	58
Seznam obrázků	58
Seznam tabulek	60
Seznam příloh.....	61

Seznam použitého značení

A	plocha průřezu, na kterou působí zatížení	[mm ²]
C _{x,y}	kovariance proměnných x,y	
DT	hodnota naměřená destruktivní metodou	
E _{m,g}	globální modul pružnosti v ohybu	[N/mm ²]
F	síla působící na zkušební těleso při zkoušce v lisu	[N]
F _{max}	maximální dosažené zatížení	[N]
KV	Kučerova vrtačka	
NDT	hodnota naměřená nedestruktivní metodou	
Obr.	obrázek	
Tab.	tabulka	
W	průřezový modul	[mm ³]
a	vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou	[mm]
a _w , b _w , l _w	rozměry zkoušeného tělesa o vlhkosti w	[m]
b	šířka zkušebního tělesa	
f _{c,0}	pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	[N/mm ²]
f _m	pevnost v ohybu	[N/mm ²]
h	výška zkušebního tělesa	[mm]
l	vzdálenost podpor v mm	
m ₁	hmotnost zkušebního tělesa před vysušením	[g]
m ₂	hmotnost zkušebního tělesa po vysušení	[g]
max	maximální	
min	minimální	
m _w	hmotnost zkoušeného tělesa o vlhkosti w	[kg]
m _x	aritmetický průměr hodnot x	
m _y	aritmetický průměr hodnot y	
n	je počet prvků hodnoceného statistického souboru	
r	součinitel korelace	
rad. sm.	radiální směr	
s _x	směrodatná odchylka hodnot x	
s _y	směrodatná odchylka hodnot y	
tan. sm.	tangenciální směr	

t_p	naměřená hloubka vpichu	[mm]
$t_{p,12}$	hloubka vpichu při vlhkosti 12%	[mm]
w	vlhkost	[%]
w	deformace	[mm]
x_i	i-tý prvek množiny x	
y_i	i-tý prvek množiny y	
α	opravný koeficient	
α	přepočtní součinitel	
ρ_w	hustota dřeva	[kg/m ³]
ρ_{12}	hustota dřeva při vlhkosti 12 %	[g/cm ³]
σ_{12}	pevnost v ohybu při 12 % vlhkosti	[MPa]
σ_w	pevnost dřeva při zkoušení	[MPa]
ϕ	průměrná hodnota	

1. Úvod

Dřevo jako stavební materiál bylo hojně využíváno po celá staletí. K útlumu došlo v polovině 19. století, kdy nastoupily moderní stavební materiály jako beton a ocel. V dnešní době je tento tradiční materiál znovu aktuální a jeho obliba stále roste. Lidé se k tradici výstavby dřevěných obydlí i jiných dřevostaveb vracejí především pro ekologičnost tohoto materiálu a také pro jeho výborné tepelně-technické vlastnosti. S nárůstem dřevostaveb roste také význam zkušebnictví dřevěných konstrukcí. Destruktivní zkoušení dřevěných konstrukcí je beze sporu objektivní a průkazné zjištění jeho vlastností, ale ne vždy lze tyto metody uplatnit. V případě, kdy nelze uplatnit destruktivní metody zkoušení dřeva je vhodné použití vzájemných korelačních vztahů mezi destruktivními a nedestruktivními nebo semidestruktivními zkouškami. Využití těchto metod je vhodné především při stavebně technických průzkumech, kde jsou zkoušky prováděny přímo na stavbě nebo tam, kde není možné odebrat vzorky pro zkoušení destruktivní.

Jednou ze semidestruktivních metod zkoušení dřeva, v dnešní době běžně používanou, je zjišťování tvrdosti dřeva pomocí kladívka Pilodyn. Z tvrdosti dřeva zjištěné kladívkem Pilodyn pak lze pomocí nástrojů matematické statistiky odvodit pevnost dřeva. Alternativou této vpichové metody by se v budoucnu mohla stát metoda zjišťování tvrdosti dřeva na základě jeho vrtatelnosti pomocí tzv. Kučerovy vrtačky, jejíž vývoj je součástí této diplomové práce. Kučerova vrtačka se v praxi běžně využívá ke zjišťování tvrdosti a následnému odvození pevnosti malt a cihel. Pro potřeby zkoušení dřeva bylo třeba vrtačku upravit a použít nástavec s vrtákem na dřevo.

Další zkoumanou metodou byla nedestruktivní metoda zjišťování rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou. Rychlost šíření ultrazvukových vln je závislá na hustotě dřeva a jeho modulu pružnosti, ale také pevnosti.

Na vybraných vzorcích dřeva byly provedeny zkoušky tvrdosti pomocí kladívka Pilodyn a pomocí Kučerovy vrtačky a také zkouška ultrazvukem. Stejně vzorky byly zároveň zkoušeny destruktivně na pevnost v tlaku a pevnost v ohybu. Z výsledků zkoušky pevnosti v ohybu byly vypočteny také moduly pružnosti. Vztah mezi hloubkou vpichu Pilodynem a pevností byl použit pro posouzení efektivnosti vyvíjené metody zjišťování tvrdosti a následného odvození pevnosti pomocí Kučerovy vrtačky. Vzájemné vztahy mezi výsledky destruktivních, semidestruktivních a nedestruktivních metod byly zjišťovány na vzorcích

suchého smrkového a borového dřeva, dále pak na vzorcích smrkového a borového dřeva, které bylo opakovaně cyklicky vystaveno vodě, mrazu a zvýšeným teplotám. Posledním souborem bylo staré smrkové dřevo, které bylo zabudované ve stavbě cca 50 let jako konstrukce krovů.

Výsledkem této práce by mělo být především odvození vzájemných matematických vztahů mezi výsledky jednotlivých zkušebních metod a doporučená metodika provádění semidestruktivních a nedestruktivních zkoušek prováděných v rámci stavebně technických průzkumů přímo na stavbě. Dílčím výsledkem by mělo být také zhodnocení vhodnosti využití Kučerovy vrtačky jako semidestruktivní metodu zjišťování pevnosti dřeva.

2. Vlastnosti dřeva

Dřevo jako stavební materiál má řadu vynikajících vlastností a výhod, které oceníme zvláště v dnešní době, kdy je kladen velký důraz na ochranu životního prostředí. Tento přírodní obnovitelný zdroj má takřka nevyčerpatelné zásoby (při správném hospodaření s obnovitelnými zdroji surovin). Ve stavebnictví využíváme dřevo pro jeho tepelné a elektroizolační vlastnosti, dobré akustické vlastnosti a především pevnost (v tahu za ohybu a tlaku), která je vzhledem k hmotnosti materiálu vysoká. Dřevo je snadno opracovatelné a nepodléhá chemické korozi. K jeho nevýhodám patří hlavně schopnost absorbovat vlhkost z okolního prostředí, což podstatně mění jeho vlastnosti a ve většině případů vede k jejich zhoršení. Dřevo je hořlavé a podléhá degradaci napadením biologickými škůdci.

Základním znakem, podle kterého můžeme posuzovat vlastnosti dřeva je jeho barva. Jednotlivé dřeviny mají různé barvy od velmi světle žluté až po hnědo červenou. Světlé dřevo má jen malý obsah pryskyřice. Čím je dřevo tmavší, tím více pryskyřice obsahuje a tím je odolnější vůči vlhkosti a hnilobě, což pozitivně ovlivňuje jeho trvanlivost. Dřeviny se světlým, méně výrazným jádrem jsou méně trvanlivé než dřeviny s tmavším jádrem. Negativní vliv na trvanlivost dřeva má střídavá vlhkost okolního prostředí. Dřevo je hygroskopický materiál, má tedy schopnost absorbovat vlhkost z okolního prostředí. Vlhkost dřeva je relativní, závisí na okolních podmínkách (relativní vlhkosti vzduchu, teplotě okolního prostředí) a vyjadřuje se jako procentuální podíl hmotnosti vody obsažené ve dřevě k hmotnosti dřeva. Všechny vlastnosti dřeva jsou více či méně ovlivňovány jeho vlhkostí. Vlhkostí dřeva je ovlivněna zejména jeho hmotnost, pevnost, pružnost, tvrdost, trvanlivost a opracovatelnost. Se změnou vlhkosti se mění rozměry dřevěného prvku a také tepelné, elektrické, akustické i optické vlastnosti dřeva. Tepelná vodivost dřeva je celkově nízká, zvyšuje se však se vzrůstající vlhkostí, objemovou hmotností a teplotou dřeva. Elektrická vodivost dřeva roste se vzrůstající vlhkostí dřeva. Suché dřevo je téměř nevodivé. V důsledku změny vlhkosti dochází také k objemovým změnám. Při vysoušení dochází k sesychání, při vlhnutí dřeva dochází k bobtnání. Objemové změny jsou různé ve směru rovnoběžném s vláknem, kolmém na vlákna a ve směru příčném.

Další významnou vlastností, která je ovlivněna množstvím vody ve dřevě je hustota dřeva. Hustota dřeva je relativní, proto ji uvádíme vždy spolu s vlhkostí, při jaké byla naměřena. Jinou veličinou je potom hustota dřevní hmoty. Ta je u většiny dřevin přibližně

stejná, kolísá v rozmezí 1440 - 1550 kg/m³ [4]. Tato hodnota vychází z hustot hlavních složek dřeva, celulózy a ligninu.

Dřevo je anizotropní materiál, proto také většina jeho vlastností je různá v různých směrech. Pevnost dřeva je výrazně vyšší ve směru rovnoběžném s vlákny než ve směru kolmém na vlákna. Na pevnost dřeva má velký vliv také hustota a především vlhkost. Se stoupající vlhkostí se až do meze hygroskopicity snižuje pevnost a pružnost dřeva. Změna pevnosti v závislosti na změně vlhkosti má všeobecně nelineární průběh. Pouze v oblasti s vlhkostí 9 – 15 % může být závislost pevnosti na vlhkosti nahrazena přímkou [2]. Modul pružnosti v tahu za ohybu se také liší ve směru rovnoběžném a kolmém na vlákna. Ve směru rovnoběžném s vlákny jsou hodnoty modulu pružnosti až dvacetkrát vyšší. Hodnota modulu pružnosti se zvyšuje s objemovou hmotností dřeva a snižuje se s jeho vlhkostí. Tepelná vodivost je různá ve směru vláken a ve směru kolmém na vlákna. Dřevo je až dvakrát vodivější ve směru vláken. Akustické vlastnosti dřeva jsou velmi dobré. Dřevo má schopnost odrážet a pohlcovat zvuk. Zvuková vodivost dřeva je vyšší ve směru rovnoběžném s vlákny.

2.1. Vlastnosti vybraných dřevin

Různé druhy dřevin mají různou stavbu, strukturu i chemické složení, což má vliv na mechanicko-fyzikální vlastnosti jednotlivých druhů dřevin. V lesních porostech České republiky jsou smrk a borovice nejrozšířenějšími dřevinami a jsou zde také nejčastěji využívány ke stavebním účelům. Proto byly tyto dřeviny vybrány také pro účely mého výzkumu. Dále se tedy budeme podrobněji zabývat vlastnostmi dřeva smrkového a borového.

Smrkové dřevo je velmi světlé, lehce nažloutlé, jádro není výrazně barevně odlišeno, ale letokruhy jsou dobře zřetelné. Objemová hmotnost přirozeně vysušeného smrkového dřeva se pohybuje okolo 400 – 450 kg/m³ [7]. Smrkové dřevo je měkké, pružné, ale přesto pevné a v suchém prostředí poměrně trvanlivé. Při trvalém kontaktu se zemí nebo ve vlhkém prostředí rychle degraduje, podléhá hnilobě a napadení dřevokazného hmyzu nebo hub. Pro snadnou opracovatelnost, pružnost a pevnost je smrkové dřevo nejvíce využívané ke stavebním konstrukčním účelům.



Obr. 1. Struktura smrkového dřeva (zleva řez příčný, řez tangenciální, řez radiální) [13].

Borové dřevo patří také mezi měkké dřeviny, ale je tvrdší. Borové dřevo má žlutou běl, oranžově hnědé jádro a výrazné letokruhy. Objemová hmotnost přirozeně vysušeného borového dřeva se pohybuje kolem 490 kg/m^3 [7]. Borové dřevo je díky vysokému obsahu pryskyřice velmi trvanlivé ve vodě. Méně odolné je na suchu a tam, kde se střídá vlhko a suchu. Borové dřevo je poměrně křehké a méně pružné než smrkové, proto není vhodné na konstrukce namáhané ohybem. Ve stavebnictví se využívá na konstrukce ve vlhkém prostředí.



Obr. 2. Struktura borového dřeva (zleva řez příčný, řez tangenciální, řez radiální) [13].

3. Výběr zkoušeného dřeva a vzorků, metodika zkoušení

Pro výzkum mechanicko-fyzikálních vlastností dřeva byly zvoleny dva druhy dřevin, dřevo smrkové a borové.

Jednotlivé vzorky byly vybrány ze dřeva podrobeného rozdílnému stupni degradace:

- nové smrkové a borové dřevo klimatizované do ustálené hmotnosti,
- dřevo smrkové a borové vystavené degradaci vlivem opakovaného (cyklického) působení vlhkosti, mrazu a zvýšených teplot,
- dřevo smrkové trvale zabudované ve stavbě jako konstrukce krovů po dobu přibližně 50 let.

Zakoupené dřevo bylo klimatizované v laboratoři stavebních hmot, při laboratorních podmínkách teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 ± 5 %. Vedle nového dřeva bylo zkoušeno také smrkové dřevo staré, které bylo odebráno ze stavby. Všechno dřevo bylo nařezáno na zkušební vzorky o rozměrech 50x50x1000 mm (vzorky pro stanovení pevnosti dřeva v ohybu) a 50x50x300 mm (vzorky pro stanovení pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny). Rozměry zkušebních vzorků byly zvoleny tak, aby vyhovovaly požadavkům normy ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností. Následně byly vzorky zatříděny do vizuálních tříd dle normy ČSN 73 2824-1.

Podle normy ČSN EN 408 byly dále prováděny destruktivní zkoušky, tedy zjišťování pevnosti v tlaku a v ohybu. Zkušební vzorky byly před destruktivním zkoušením podrobeny testování pomocí nedestruktivní metody (ultrazvuk) a následně po provedení destruktivních zkoušek (pevnost dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny a pevnost dřeva v ohybu) zkoušeny pomocí semidestruktivních metod (Pilodyn, Kučeroва vrtačka).

3.1. Třídění dřeva podle pevnosti dle ČSN 73 2824-1

Dle platné normy ČSN 73 2824-1 se řezivo třídí vizuálně do vizuálních tříd a strojně do pevnostních tříd. Tato norma je překladem DIN 4074-1 a vyhovuje minimálním požadavkům DIN EN 14081-1.

Vizuální třídy dle ČSN 73 2824-1 jsou:

- řezivo třídy S7
- řezivo třídy S10
- řezivo třídy S13

Znaky třídění jehličnatého řeziva dle ČSN 73 2824-1:

- suky
- odklon vláken
- šířka letokruhů
- trhliny
- oblíny
- zakřivení
- zbarvení, hniloba
- tlakové dřevo
- poškození dřevokazným hmyzem napadajícím čerstvé dřevo
- další znaky jakými jsou mechanické poškození, poškození cizopasnými rostlinami, zárost, zhojená poranění kmene, vrcholový lom

3.1.1. Popis jednotlivých posuzovaných znaků třídění jehličnatého řeziva

Suky jsou pozůstatky odumřelých nebo zbytky živých větví obrostlé dřevem. Jejich vzniku nelze nijak zabránit, vznikají již ve fázi růstu dřeviny. Suk roste ve směru kolmém na vlákna a narušuje tím strukturu dřeva. Dřevo suku má zpravidla větší hustotu než okolní dřevo, proto se více sesychá a suky potom mohou vypadávat. Suky se také hůře opracovávají. Dělíme je podle seskupení na jednotlivé a přeslenovité a podle postavení na plochách na oválné, kruhové a křídlové.

Odklon vláken je vada, která vzniká stejně jako suky ve fázi růstu dřeviny. Příčinou mohou být růstové odchylky, točitý růst nebo křivost kmene.

Šířka letokruhů se pro účely zařizování dřeva do vizuálních tříd uvažuje jako průměrná šířka přírůstku dřeva za jedno vegetační období. U většiny dřevin jsou tyto přírůstky jasně zřetelné díky odlišnému zbarvení vrstvy jarního a letního dřeva.

Trhliny jsou vady, které mohou vznikat jak ve fázi růstu, tak ve fázi zpracování dřeviny a později i na dřevě již zabudovaném ve stavbě. Trhliny vznikají v důsledku namáhání oddělením vláken v podélném směru. Trhliny rozdělujeme podle polohy ve dřevě na středové, povrchové a odlupčivé.

Obliny, neboli zaoblení hrany prvku se při zatřídování řeziva do vizuálních tříd uvažují jako poměr délky zaoblení hrany k celkové délce hrany.

Zakřivení deskového řeziva může mít několik různých příčin. Především vlhkost dřeva má na zakřivení rozhodující vliv [12]. Rozdílné sesychání v tangenciálním a radiálním směru může způsobit zakřivení příčné. Šroubovitě zakřivení bývá způsobeno točivostí vláken nebo tlakovým dřevem.

Zabarvením dřeva je myšlena změna přirozené barvy dřeva. Ve většině případů je zabarvení způsobeno vlivem hniloby nebo napadení dřeva dřevokaznými houbami.

Tlakové dřevo vzniká v živém stromě ve fázi růstu jako reakce na vnější namáhání a projevuje se lokální změnou struktury dřeva.

Poškození dřevokazným hmyzem je napadení dřeva živými organizmy, které způsobují svou činností rozklad dřevní hmoty. Napadení dřeva dřevokazným hmyzem bývá dobře viditelné díky požerkovým otvorům na povrchu dřeva.

Ze vzorků nového smrkového a borového dřeva zatříděných do vizuální třídy S13 byly pro každou dřevinu náhodně vybrány 2 soubory po 15 -ti kusech vzorků o rozměrech 50x50x1000 mm a 2 soubory po 15 -ti kusech vzorků o rozměrech 50x50x300 mm.

Ze vzorků starého smrkového dřeva odebraného z konstrukce byl vybrán maximální možný počet vzorků, které bylo možné zatřídit do vizuálních tříd dle normy. Největším problémem starého dřeva byla značná sukovitost. Velikost suků se tak stala prakticky jediným třídícím kritériem. Ostatní třídící znaky vyhověly bez problémů. Ze všech vzorků bylo nakonec vybráno 20 vzorků o rozměrech 50x50x1000 mm z nichž 10 bylo zatříděno do vizuální třídy S10 a 10 do vizuální třídy S7. Ze vzorků o rozměrech 50x50x300 mm bylo rovněž 10 ks zatříděno do vizuální třídy S10 a 10 ks do vizuální třídy S7.

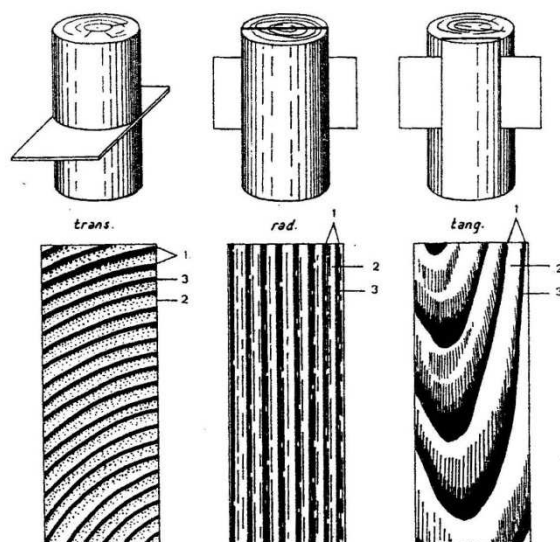
Tab. 1. Počty vzorků dřeva.

Druh dřeva	Stáří dřeva	Vizuální třída	Rozměry vzorku	Počet vzorků
Smrkové	nové	S13	50x50x1000 mm	15 ks
			50x50x300 mm	15 ks
	zestařené cyklováním		50x50x1000 mm	15 ks
			50x50x300 mm	15 ks
	staré	S10	50x50x1000 mm	10 ks
			50x50x300 mm	10 ks
		S7	50x50x1000 mm	10 ks
			50x50x300 mm	10 ks
Borové	nové	S13	50x50x1000 mm	15 ks
			50x50x300 mm	15 ks
	zestařené cyklováním		50x50x1000 mm	15 ks
			50x50x300 mm	15 ks
Celkem zkoušených vzorků				160 ks

3.2. Metodika zkoušení

Každý vzorek byl nejdříve změřen a zvážen. Potom bylo provedeno měření rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou. Dále byly vzorky zkoušeny destruktivně a nakonec byla provedena zkouška Pilodynem a Kučerovou vrtačkou. Vždy po provedení destruktivní zkoušky byla změřena vlhkost vzorku gravimetrickou metodou dle normy.

Jak již bylo zmíněno výše, dřevo je anizotropní materiál, jeho vlastnosti jsou tedy různé ve směru tangenciálním, radiálním a příčném. Vlastnosti zjišťované pomocí nedestruktivních nebo semidestruktivních zkoušek byly proto také zjišťovány v různých směrech.



Obr. 3. Základní řezy dřevem. Zleva řez transverzální (příčný), řez radiální, řez tangenciální. 1-letokruh, 2-jarní dřevo, 3-letní dřevo [2].

Pro udržení konstantní vlhkosti vzorků v časových prodlevách mezi jednotlivými zkouškami a měřeními byly vzorky dřeva baleny do plastové fólie, která zabránila nežádoucímu vysychání. Podmínky (laboratorní prostředí) pro zkoušení dřeva byly stejné pro všechny zkoušené vzorky.

3.2.1. Dřevo suché - klimatizované

Nové smrkové a borové dřevo bylo dřevo bylo klimatizované v Laboratoři stavebních hmot. Za klimatizované se podle ČSN EN 408 považuje takové dřevo, které bylo uloženo při teplotě $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(65 \pm 5) \%$ a jehož hmotnost zvážená ve dvou po sobě následujících váženích v rozmezí 6 hodin se od sebe neliší o více než 0,1 % hmotnosti. Na dřevě klimatizovaném do ustálené hmotnosti byly prováděny všechny potřebné zkoušky a měření.

3.2.2. Dřevo cyklované – podrobené zetaření vlivem opakovaného působení vlhkosti, mrazu a zvýšených teplot

Z celkového množství vzorků nového smrkového a borového dřeva byla polovina vzorků podrobena tzv. cyklování. Dřevo bylo několikrát opakovaně vystaveno vodě, mrazu a zvýšeným teplotám v sušárně. Cílem celého procesu bylo uměle navodit zetaření dřeva působením vlivů, které jsou předpokládány při běžném provozu konstrukce. Na cyklovaném dřevě byly provedeny stejné zkoušky a měření jako na dřevě vysušeném. Po cyklování byly

na vzorcích zaznamenány změna barvy dřeva, vznik trhlin a fleky roztavené smoly na povrchu vzorků. Jak smrkové tak borové dřevo cyklované mělo oproti dřevu necyklovanému našedlou barvu. U cyklovaného smrkového dřeva byly zjištěny na příčném řezu středové trhliny, které probíhaly kolmo na letokruhy. U cyklovaného borového dřeva byly zjištěny jak středové tak povrchové trhliny, jejichž průměrná šířka byla 0,3 mm. Lesklé fleky od roztavené smoly na povrchu vzorků byly zaznamenány jen u dřeva borového.



Obr. 4. Trhliny vzniklé na vzorcích smrkového a borového dřeva po cyklování.



Obr. 5. Fleky roztavené smoly na povrchu vzorků.

Celý proces byl proveden podle normy ČSN EN 321 Desky ze dřeva – Stanovení odolnosti proti vlhkosti zkouškou cyklováním. Nejdříve bylo dřevo ponořeno do vody o teplotě $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ po dobu (70 ± 1) h. Po vyjmutí z vodní lázně se vzorky nechaly několik minut okapat a pak byly vloženy do mrazničky, kde se teplota pohybovala v rozmezí od $-12 ^\circ\text{C}$ do $-25 ^\circ\text{C}$. Mražení trvalo (24 ± 1) h. Po vyjmutí z mrazničky se tělesa hned vložila do sušárny, kde byla teplota $(70 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Sušení probíhalo (70 ± 1) h. Po vytáhnutí ze sušárny se tělesa nechají chladit v prostředí o teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ po dobu $(4 \pm 0,5)$ h. Po každém cyklu se vzorky dřeva otočí tak, aby ležely na protilehlém boku. Jednotlivé cykly se opakují celkem 3x [9].



Obr. 6. Uložení vzorků 50x50x300 mm v mrazicím zařízení.



Obr. 7. Uložení vzorků ve vodě.



Obr. 8. Uložení vzorků 50x50x1000 mm v mrazicím zařízení.



Obr. 9. Uložení vzorků v sušárně.

3.2.3. Dřevo smrkové staré

Staré smrkové dřevo bylo odebráno z krovů, které byly po dobu cca 50 let zabudovány ve stavbě. Vzorky byly odebrány převážně z trámů, jejichž rozměry byly 200x200 mm. Každý trám byl rozřezán na 4 hranolky o rozměrech 50x50 mm. Následně byly nařezány vzorky o délce 1000 mm a 300 mm. Řezání na potřebné rozměry bylo prováděno tak, aby bylo co nejvíce minimalizováno množství suků na měřených vzorcích.

Tab. 2. Počty opakování jednotlivých zkoušek na každém vzorku.

Zkouška	Rozměry vzorku	Směr provádění zkoušky	Počet opakování zkoušky
Pilodyn	50x50x1000 mm	tangenciální	20 vpichů
		radiální	20 vpichů
	50x50x300 mm	tangenciální	10 vpichů
		radiální	10 vpichů
Ultrazvuk	50x50x1000 mm	tangenciální	3 měření
		radiální	3 měření
		rovnoběžně s vlákny	3 měření
	50x50x300 mm	tangenciální	3 měření
		radiální	3 měření
		rovnoběžně s vlákny	3 měření
Kučerova vrtačka	50x50x1000 mm	tangenciální	28 vrtů
		radiální	28 vrtů
	50x50x300 mm	tangenciální	14 vrtů
		radiální	14 vrtů
Pevnost v ohybu	50x50x1000 mm	radiální	1x
Pevnost v tlaku	50x50x300 mm	rovnoběžně s vlákny	1x

4. Popis zkušebních metod

Všechny zkoušky a měření byly provedeny podle postupů uvedených v příslušných normách. Tam, kde nebyl postup měření stanoven normou, bylo postupováno podle návodů doporučených výrobcem zkušebního přístroje.

4.1. Zjištění základních fyzikálních vlastností

4.1.1. Stanovení hustoty dřeva dle ČSN EN 408

Dřevo velmi snadno přijímá vodu a podle obsahu vody se také mění jeho hustota. Proto se při určování objemové hmotnosti dřeva uvádí také jeho vlhkost. Podstata zkoušky spočívá v měření rozměrů a vážení vzorku a následném výpočtu objemové hmotnosti. U zkušebních těles zkoušených kolmo k vláknům (např. pevnost dřeva v ohybu) se hustota stanovuje před destruktivní zkouškou a to na celém zkušebním tělese. U zkušebních těles zkoušených ve směru rovnoběžně s vlákny (např. pevnost dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny) se hustota stanovuje na příčném řezu odebraném ze zkušebního tělesa. Odebraný vzorek musí být z celého průřezu a nesmí obsahovat suky a smolníky. Pokud se jedná o zkoušku pevnosti, vzorek se odebírá v místě co nejbližší porušení. Hustota dřeva se stanoví výpočtem podle vztahu (1) [11].

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} \quad [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (1)$$

kde m_w je hmotnost zkoušeného tělesa o vlhkosti w v kg
 a_w, b_w, l_w jsou rozměry zkoušeného tělesa o vlhkosti w v m

4.1.2. Stanovení vlhkosti dřeva váhovou metodou dle ČSN EN 13183-1

Vlhkost dřeva se stanovuje jako procentuální podíl hmotnosti vody obsažené ve vzorku a hmotnosti téhož vzorku ve vysušeném stavu. Norma předepisuje minimální rozměry zkušebního hranolu 20x20x20 mm. Zkušební vzorek musí být bez vad, jako jsou

suky, smolníky, kůra nebo prosmoly. Vzorek musí být vyříznut ze středu tělesa nebo alespoň 300 mm od okraje.

Vzorek nejdříve zvážíme s přesností na 0,01 g a pak ho dáme vysušit do sušičky, která umožňuje regulaci teploty v rozmezí 103 ± 2 °C. Vzorek se vysuší až do ustálené hmotnosti (ve dvou po sobě jdoucích váženích v rozmezí 2 hodin se hmotnost vzorku neliší o více než 0,1 % hmotnosti). Vlhkost dřeva se pak vypočte podle vztahu (2) [8].

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (2)$$

kde m_1 je hmotnost zkušebního tělesa před vysušením v g
 m_2 je hmotnost zkušebního tělesa po vysušení v g

4.2. Nedestruktivní zkoušení

Nedestruktivním zkoušením nazýváme takové zkoušení, při němž nedochází k poškození zkoušeného prvku. Stopy po nedestruktivně provedené zkoušce jsou jen velmi malé nebo žádné. Příkladem nedestruktivního zkoušení dřeva je měření rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou.

4.2.1. Ultrazvukové měření dřeva

Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln ve dřevě se provádí pomocí přístroje SylvatestDUO s frekvencí 22 kHz. Lze měřit rostlé i lepené lamelové dřevo v rozsahu 80 cm – 20 m [15]. SylvatestDUO je primárně určen ke zjišťování hustoty a modulu pružnosti při zatřídování dřeva. V praxi se však dá rovněž využít při stavebně technických průzkumech ke zjištění poškození dřeva vlivem biologických činitelů.

Na dobu přenosu vln ve dřevě mají vliv hustota dřevní hmoty, dutiny, růstové nepravidelnosti, cizorodé prvky nebo dřevo v rozkladu. Doba přenosu vln se výrazně prodlužuje, je-li prvek degradován biotickými škůdci. Dřevo má v různých směrech různé vlastnosti, proto také záleží na směru šíření signálu ultrazvukových vln. Poměr rychlostí šíření vln dřevní hmotou ve směru podélném, radiálním a tangenciálním je 15:5:3. Ve zdravém

dřevě se vlny šíří rychlostí 3500 - 5000 m/s ve směru podélném, ve směru kolmo na vlákna je rychlost 1000 - 1500 m/s.

Protože Laboratoře stavebních hmot nejsou vybaveny přístrojem SylvatestDUO, ke zjištění rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou byl použit přístroj TICO s frekvencí sond 54 kHz. Rychlost průchodu ultrazvukových vln byla změřena na všech vzorcích vždy ve třech různých místech tangenciálního, radiálního i příčného směru.



Obr. 10. Přístroj na měření rychlosti šíření ultrazvukových vln TICO s frekvencí 54kHz.



Obr. 11. Kalibrace přístroje TICO.



Obr. 12. Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou.

4.3. Semidestruktivní zkoušení

Mezi semidestruktivní metody zkoušení patří zkouška pomocí kladívka Pilodyn či zjišťování vrtatelnosti pomocí Kučerovy vrtačky. Při použití semidestruktivních metod dojde jen k částečnému narušení vzorku nebo zkoušené konstrukce (vpichy, vrypy, vrty aj.), funkce konstrukce však není použitím těchto metod narušena. Dochází pouze k vizuálnímu porušení na povrchu zkoušeného prvku.

4.3.1. Stanovení tvrdosti dřeva kladívkem Pilodyn

Tato semidestruktivní metoda je vhodná především ke stanovení místní tvrdosti dřeva a lokalizaci poškozené části prvku dřevěné konstrukce. Pomocí Pilodynu můžeme také objektivně posoudit poškození dřeva biologickými škůdci a s tím spojené snížení pevnosti. Kladívkem Pilodyn se do dřeva konstantní energií 6 kJ zaráží ocelový razník o průměru 2,5 mm. Na stupnici Pilodynu se odečítá hloubka vniku ocelového razníku do dřevní hmoty. Porovnání hloubky vniku na různých místech konstrukce lze přesně lokalizovat oblast poškození. Z hloubky vniku lze za pomoci korelačních vztahů také odvodit pevnost dřeva nebo hustotu.

Pro dostatečnou objektivnost výsledků bylo třeba provést na každém vzorku dostatečný počet vpichů. Na vzorcích zkoušených na pevnost dřeva v ohybu bylo provedeno 20 měření ve směru tangenciálním a 20 měření ve směru radiálním. Na vzorcích určených pro stanovení pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny bylo provedeno 10 měření v každém směru.



Obr. 13. Přístroj Pilodyn J6.



Obr. 14. Detail ocelového razníku Pilodynu.



Obr. 15. Měření hloubky vniku ocelového razníku přístrojem Pilodyn.



Obr. 16. Detail vniku ocelového razníku do dřevní hmoty.

4.3.2. Stanovení tvrdosti dřeva v závislosti na jeho vrtatelnosti pomocí Kučerovy vrtačky

Kučerova vrtačka je přístroj, který je primárně určen ke zjišťování pevnosti cihel a malt. Pro potřeby zkoušení dřeva bylo třeba vrtačku upravit a použít nástavec s vrtákem na dřevo. Jedná se o příklepovou vrtačku, na níž je možné nastavit délku vrtání, která je pak stejná pro každý vrt. Zkušební vzorek musí být pevně ukotven k podložce tak, aby nedocházelo k jeho vertikálnímu pohybu. Vrták opřeme kolmo na plochu vrtaného vzorku a namáčkne příklep vrtačky do střední polohy. V této poloze udržujeme vrtačku po celou dobu vrtání. Následně posuvným měřítkem změříme hloubku vrtu.

Stejně jako při zkoušení Pilodynem bylo hlavním cílem dosáhnout maximálního možného počtu vrtů z důvodu co nejpřesnějšího statistického zhodnocení této metody. Pro vzorky pro zkoušku pevnosti dřeva v ohybu byl počet vrtů 28 v tangenciálním směru a 28 vrtů v radiálním směru. U kratších vzorků pro zkoušku pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny byl počet vrtů poloviční, tedy 14 vrtů v každém směru.



Obr. 17. Kučerova vrtačka a posuvné měřítko k měření hloubky vrtu.



Obr. 18. Nástavec s vrtákem na dřevo.



Obr. 19. Rozmístění vrtů na vzorku dřeva.



Obr. 20. Navrtané vzorky dřeva.



Obr. 21. Vrtání pomocí Kučerovy vrtačky.



Obr. 22. Detail vrtání.



Obr. 23. Etalon z dubového dřeva.



Obr. 24. Hloubka měření vrtu posuvným měřítkem.

Protože měření hloubky vrtu navrtaného Kučerovou vrtačkou do dřeva nebylo nikdy dříve vyzkoušeno, bylo třeba také zjistit, zda se vrták použitý při měření po určitém počtu vrtů otupí, případně do jaké míry. Ověřování ostrosti vrtáku bylo zjišťováno prováděním 10 vrtů do tzv. etalonu po každých 100 vrtech. Jako etalon byly použity desky dubového dřeva o tloušťce 50 mm (*Obr. 21*). Jednotlivá měření na etalonu byla číslována postupně, podle průběhu měření. Výsledky měření na etalonu byly zaznamenány do tabulky (příloha 18). Z výsledků měření na etalonu je vidět, že nedochází k rapidnímu poklesu hloubky vrtu. Zhruba od měření s pořadovým číslem 30 však můžeme sledovat lehkou tendenci zmenšování hloubky vrtu. Zde je však potřeba říct, že hloubku vrtu může ovlivňovat mnoho vnějších vlivů. Zejména může měření ovlivňovat hustota dubového dřeva, šířka letokruhů a s tím související pevnost dubového dřeva.

Na základě výsledků měření ostrosti vrtáku na etalonu z dubového dřeva by bylo vhodné (přestože výsledky neprokázaly výrazné otupení vrtáku ani po více než 6500 vrtech) zvážit výměnu vrtáku přibližně po 3000 vrtech.

4.4. Destruktivní zkoušení

Destruktivní zkouška je taková, při níž dojde k celkové destrukci zkoušeného vzorku, případně konstrukčního prvku. Destruktivní zkoušky se nejčastěji provádějí na normou předepsaných vzorcích ve zkušebním lisu a zjišťujeme jimi maximální sílu, které je vzorek schopen odolat. Z výsledků zkoušky pak dle výpočetních vztahů stanovujeme pevnosti nebo moduly pružnosti materiálů.

4.4.1 Stanovení pevnosti v ohybu dle ČSN EN 408

Předepsaná délka zkušebního tělesa je 19 -ti násobek jeho výšky. Těleso je zatěžováno dvěma břemeny, jejichž vzdálenost od podpor je 6 -ti násobek výšky zkušebního tělesa. Vzdálenost podpor je 18 -ti násobek výšky zkušebního tělesa. Zatěžovací hlava lisu se pohybuje konstantní rychlostí a zařízení má být nastaveno tak, aby došlo k porušení vzorku v průběhu 300 ± 120 s od začátku zatěžování [11]. Dojde-li k porušení mimo toto časové rozmezí, měření se do konečných výsledků zkoušky nezapočítává. Pevnost v ohybu se vypočte podle vztahu (3). Příklad výpočtu charakteristické pevnosti v ohybu je uveden v tabulce (Tab. 3), veškeré ostatní tabulky pro výpočet charakteristické pevnosti v ohybu jsou uvedeny v příloze č. 3.

$$f_m = \frac{a \cdot F_{\max}}{2 \cdot W} \quad [N / mm^2] \quad (3)$$

<i>kde</i>	<i>a</i>	<i>je vzdálenost mezi působišťem zatížení a nejbližší podporou v mm</i>
	<i>F_{max}</i>	<i>je maximální dosažené zatížení v N</i>
	<i>W</i>	<i>je průřezový modul v mm³</i>



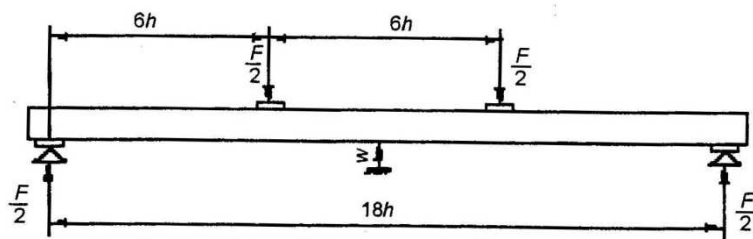
Obr. 26. Zkouška pevnosti v ohybu.



Obr. 27. Detail porušení vzorku při zkoušce pevnosti v ohybu.

Tab. 3. Příklad stanovení charakteristické pevnosti v ohybu.

Borové dřevo cykly (ohyb) - Stanovení charakteristické pevnosti v ohybu											
vzorek	w [mm]	F _{max} [kN]	t [min]	W [mm ³]	f _m [Mpa]	f _{m,12} [Mpa]	f ₀₅ [Mpa]	k _h	f ₀₅ opr.	Φ f ₀₅ opr.	f _k [Mpa]
BC14	27,83	13,00	5:25	19918,47	97,88	87,15	46,83	1,252	37,41	37,42	28,29
BA1	34,70	12,44	6:33	21687,84	86,03	73,07		1,244	37,66		
BA6	34,63	13,24	6:33	20041,14	99,08	86,49		1,253	37,38		
BC11	26,70	13,09	5:09	19911,54	98,65	82,18		1,253	37,37		
BA10	36,61	12,19	6:48	19404,39	94,22	79,45		1,256	37,28		
BB1	21,09	10,06	4:07	20397,52	74,00	63,56		1,247	37,54		
BB17	19,35	7,49	3:44	17940,93	62,60	56,63		1,263	37,08		
BC7	33,56	13,03	6:18	20819,90	93,84	81,60		1,248	37,51		
BC20	24,27	12,62	4:43	18755,56	100,93	85,85		1,260	37,16		
BB16	22,62	8,32	4:17	20907,60	59,66	53,39		1,247	37,55		
BD4	30,07	9,32	5:35	20542,30	68,05	58,91		1,250	37,46		
BD3	26,39	9,11	4:59	21418,40	63,78	50,18		1,249	37,50		
BD16	35,08	10,86	6:29	21183,94	76,89	61,44		1,248	37,51		
BE2	33,62	10,58	6:25	20498,86	77,43	64,35		1,249	37,50		
BE11	19,78	7,25	3:45	19898,39	54,65	46,83		1,252	37,39		



Obr. 25. Uspořádání zkoušky pro měření pevnosti v ohybu a globálního modulu pružnosti v ohybu [11].

4.4.2. Stanovení globálního modulu pružnosti dle ČSN EN 408

Zkušební těleso, zařízení i rozměry jsou shodné jako u zkoušení pevnosti v ohybu. Maximální rychlost zatěžování je 0,003 h (výška tělesa) mm/s. Maximální působící zatížení nesmí překročit 0,4 F_{\max} . F_{\max} se stanoví ze zkoušek nejméně 10 vzorků dřeva stejného druhu, stejných rozměrů a stejné jakostní třídy nebo z vhodných existujících údajů [11].

Pro účely tohoto výzkumu byl globální modul pružnosti v ohybu stanoven z výsledků zkoušky pevnosti v ohybu a vypočítán podle vztahu (4).

$$E_{m,g} = \frac{l^3 \cdot (F_2 - F_1)}{b \cdot h^3 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot a}{4 \cdot l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad [N / mm^2] \quad (4)$$

<i>kde</i>	$F_2 - F_1$	<i>je přírůstek zatížení v N na regresní přímce se součinitelem korelace 0,99 nebo lepším</i>
	$w_2 - w_1$	<i>je přírůstek deformace odpovídající $F_2 - F_1$ v mm</i>
	a	<i>vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou v mm</i>
	l	<i>je vzdálenost podpor v mm</i>
	b	<i>je šířka zkušebního tělesa v mm</i>
	h	<i>je výška zkušebního tělesa v mm</i>

4.4.3. Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny dle ČSN EN 408

Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny se stanovuje na tělesech o rozměrech 50x50x300 mm. Spodní i horní zatěžovaná plocha tělesa musí být dokonale rovinná. Zkušební těleso se zatěhuje dostředně, v lisu s kulově uloženými zatěžovacími hlavami. Těleso je zatěžováno konstantní silou tak, aby k porušení došlo v průběhu 300 ± 120 s od zavedení zatížení [11]. Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny se vypočítá dle vztahu (5). Příklad výpočtu charakteristické pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny je uveden v tabulce (Tab. 4), veškeré ostatní tabulky pro výpočet charakteristické pevnosti v tlaku jsou uvedeny v příloze č. 4.

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad [N / mm^2] \quad (5)$$

kde F_{\max} je maximální dosažené zatížení v N
 A je plocha průřezu, na kterou působí zatížení v mm^2



Obr. 28. Zkouška pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny.



Obr. 29. Detail porušení vzorku při zkoušce pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny.

Tab. 4. Příklad stanovení charakteristické pevnosti v tlaku.

Smrkové dřevo suché (tlak) - Stanovení charakteristické pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny										
vzorek	w [mm]	F _{max} [kN]	t [min]	f _{c,0} [MPa]	f _{c,0,12} [Mpa]	f _{05,snížené}	k _h	f _{05 opr.}	Φ f _{05 opr.}	f _{c,0,k} [MPa]
St11	2,22	140,96	4:13	54,92	35,15	14,891	1,248	11,93	11,93	9,02
St12	2,61	143,98	4:34	55,71	35,65		1,248	11,94		
St13	2,56	142,59	4:24	55,00	35,20		1,248	11,93		
St14	3,08	129,86	4:35	52,42	33,55		1,249	11,93		
St21	2,59	108,04	3:53	45,19	28,92		1,256	11,85		
St22	2,80	113,36	4:03	44,12	28,24		1,245	11,96		
St23	2,76	107,15	3:57	42,49	27,19		1,247	11,94		
St24	2,41	60,80	3:13	23,27	14,89		1,247	11,94		
St31	2,79	107,74	3:57	43,93	28,11		1,244	11,97		
St32	2,85	96,70	3:45	42,51	27,21		1,248	11,94		
St33	2,93	108,52	3:56	46,34	29,66		1,248	11,93		
St34	2,69	82,14	3:29	35,75	22,88		1,243	11,98		
St41	3,29	92,69	4:04	36,71	23,50		1,252	11,89		
St42	2,91	106,45	3:53	43,21	27,65		1,253	11,89		
St43	2,38	95,21	3:19	37,95	24,29		1,248	11,94		

Tab. 5. Charakteristické pevnosti zkoušeného dřeva.

Druh dřeva	Stáří dřeva	Pevnostní třída	Charakteristická pevnost v tlaku [Mpa]	Charakteristická pevnost v ohybu [MPa]
Smrkové	nové	S13	9,02	23,12
	zestařené cyklováním		13,54	27,14
	staré	S10	17,93	12,60
		S7	12,02	10,90
Borové	nové	S13	18,71	26,99
	zestařené cyklováním		15,64	28,29

4.5. Stanovení charakteristických hodnot a přepoččet na 12% vlhkost

Z výsledků destruktivních zkoušek byla stanovena charakteristická pevnost v tlaku, v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Výpočet charakteristických pevností byl proveden podle normy ČSN EN 384 Konstrukční dřevo – Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty.

Protože zkoušené vzorky neměly při zkouškách 12 % vlhkost, bylo třeba výsledky zkoušek na 12 % vlhkost přepočítat. Pro pevnost v tlaku je tento přepoččet stanoven normou ČSN EN 384. Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny se mění o 3 % pro každé procento rozdílu vlhkosti od referenčních podmínek, tedy 12 %. Při stanovení charakteristické pevnosti v ohybu se rozdíl vlhkosti neuvažuje, pokud je průměrná vlhkost dřeva v rozmezí 10 – 18 %. Protože zkoušené vzorky dřeva vykazovaly v době provádění zkoušky vlhkost nižší než 10 %, byl pro přepoččet pevnosti v ohybu na 12 % pevnost použit vztah (6). Tento vztah vychází z předpokladu, že změna pevnosti dřeva v závislosti na vlhkosti má v intervalu vlhkostí 9 – 15 % lineární průběh. Se stoupající vlhkostí se pevnost dřeva snižuje v průměru o 3 – 4 % [2].

$$\sigma_{12} = \sigma_w [1 + \alpha(w - 12)] \quad [MPa] \quad (6)$$

<i>kde</i>	σ_{12}	<i>je pevnost v ohybu při 12 % vlhkosti v MPa</i>
	σ_w	<i>je pevnost dřeva při zkoušení v MPa</i>
	w	<i>je vlhkost dřeva v době zkoušení v %</i>
	α	<i>je opravný koeficient, který podle [2] nabývá hodnoty 0,04</i>

Pro přepoččet hloubky vpichu kladívkem Pilodyn na hloubku vpichu při 12 % vlhkosti byl použit vztah (7) [14]. Závislost mezi vlhkostí a hloubkou vpichu je taková, že s rostoucí vlhkostí se hloubka vpichu zvětšuje.

$$t_{p,12} = t_p (1 - 0,007 \Delta w) \quad [mm] \quad (7)$$

$$\Delta w = w - 12\% \quad [\%] \quad (8)$$

<i>kde</i>	$t_{p,12}$	<i>je hloubka vpichu při vlhkosti 12 % v mm</i>
	t_p	<i>je naměřená hloubka vpichu v mm</i>
	w	<i>je vlhkost dřeva v době zkoušení v %</i>

Vztah mezi hustotou a vlhkostí dřeva je dán normou ČSN EN 384. Hustotu dřeva redukuje o 0,5 % pro každé procento rozdílu vlhkosti, je-li vlhkost dřeva vyšší než 12 %. Je-li vlhkost dřeva nižší než 12 %, hustotu navyšujeme o 0,5 % pro každé procento rozdílu vlhkosti.

Vlhkost nebyla přepočítaná pouze u rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou a u hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou. Upřesněný vztah, který by jednoznačně vypovídal o závislosti mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou a vlhkostí dřeva v současnosti není znám. Názory autorů odborné literatury na toto téma se různí. Zdali existuje vztah mezi vlhkostí dřeva a hloubkou vrtu Kučerovou vrtačkou zatím není jasné, neboť tato metoda zkoušení je v podstatě teprve ve fázi vývoje. Pro stanovení závislosti rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou a hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou s ostatními měřenými vlastnostmi byly použity hodnoty nepřepočtené.

5. Statistické vyhodnocení výsledků a zjišťování závislostí

Dřevo je materiál anizotropní a poměrně nehomogenní. Tento fakt velmi ztěžuje jednoznačné určení závislostí mezi jednotlivými vlastnostmi dřeva. K objektivnímu zjištění je proto třeba odzkoušet, co možná nejvyšší možný počet vzorků a vhodným statistickým vyhodnocením vyloučit případné chyby měření tak aby byly výsledky objektivní a dosahovaly potřebné přesnosti. Výsledky byly statisticky vyhodnoceny pomocí programu Microsoft Office Excel.

5.1. Statistické metody aplikované při hledání závislostí mezi zjištěnými vlastnostmi dřeva

Funkční závislost mezi dvěma veličinami lze vyjádřit pomocí funkce, jejíž průběh může být různý. Nejjednodušší takovou funkcí je funkce lineární, pomocí níž můžeme vyjádřit většinu závislostí mezi vlastnostmi dřeva zjištěnými destruktivně, semidestruktivně a nedestruktivně v rámci této práce.

Ke zjištění nejvhodnější lineární aproximace destruktivně a nedestruktivně (semidestruktivně) zjištěných vlastností byla použita metoda nejmenších čtverců. Pomocí této metody hledáme konstanty a, b funkce $f(y) = ax + b$ takové, aby součet kvadratických odchylek naměřených hodnot od přímky byl co nejmenší. Koeficienty a, b lze vypočítat podle vzorců (9) a (10) [1].

$$a = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (9)$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (10)$$

<i>kde</i>	x_i	<i>je i-tý prvek množiny x</i>
	y_i	<i>je i-tý prvek množiny y</i>
	n	<i>je počet prvků hodnoceného statistického souboru</i>

Protože metodou nejmenších čtverců můžeme proložit v podstatě jakoukoli skupinu bodů $[x,y]$, samotným proložením přímkou nezjistíme jak úzce spolu proměnné x,y souvisí, neboli do jaké míry spolu korelují. Korelaci lze vyjádřit pomocí součinitele korelace r . Korelaci lze vyjádřit také součinitelem determinace, který je roven druhé mocnině součinitele korelace (R^2). Korelační součinitel vyjadřuje, do jaké míry jsou body $[x,y]$ na grafu uspořádány poblíž přímky proložené těmito body pomocí metody nejmenších čtverců. Součinitel korelace nabývá hodnot $-1 \leq r \leq 1$. Hodnota součinitele korelace $r = -1$ vyjadřuje nejvíce zápornou korelaci tedy nepřímou úměrnost (s rostoucím x klesá y). Hodnota součinitele korelace $r = 1$ vyjadřuje nejvíce kladnou korelaci tedy přímou úměrnost (s rostoucím x roste y) [3]. Součinitel korelace lze vypočítat jako podíl kovariance proměnných x,y a součinu směrodatných odchylek x a y podle vztahu (11) [6].

$$r = \frac{C_{x,y}}{s_x s_y} \quad (11)$$

$$C_{x,y} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x) \cdot (y_i - m_y) \quad (12)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{(n-1)}} \quad (13)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (14)$$

<i>kde</i>	r	<i>je součinitel korelace</i>
	$C_{x,y}$	<i>je kovariance proměnných x,y</i>

s_x	<i>je směrodatná odchylka hodnot x vypočtená podle vztahu (13)</i>
s_y	<i>je směrodatná odchylka hodnot y vypočtená podle vztahu (13)</i>
m_x	<i>je aritmetický průměr hodnot x vypočtený podle vztahu (14)</i>
m_y	<i>je aritmetický průměr hodnot y vypočtený podle vztahu (14)</i>
n	<i>je počet prvků hodnoceného statistického souboru</i>

Pro přepočet výsledků mezi destruktivními a nedestruktivními zkouškami se běžně používá přepočtní součinitel α . Tento součinitel můžeme vypočítat jako podíl destruktivně naměřených hodnot a nedestruktivně naměřených hodnot (15) tam, kde mezi nimi platí přímá úměrnost. V případě nepřímé úměrnosti vypočítáme přepočtní součinitel α jako součin destruktivně a nedestruktivně naměřených hodnot (16).

$$\alpha = \frac{DT}{NDT} \quad (15)$$

$$\alpha = DT \cdot NDT \quad (16)$$

<i>kde</i>	DT	<i>je hodnota naměřená destruktivní metodou</i>
	NDT	<i>je hodnota naměřená nedestruktivní nebo semidestruktivní metodou</i>

5.2. Metodika hodnocení výsledků

Hodnoty získané semidestruktivním měřením (měření hloubky vpichu kladívkem Pilodyn přepočtené na 12 % vlhkost a měření hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou) na jednotlivých vzorcích byly zaznamenány do tabulek a statisticky vyhodnoceny. Pomocí jednoduchých statistických veličin byly vypočteny aritmetické průměry:

- všech naměřených hodnot,

- hodnot, které se od aritmetického průměru nelišily o více než \pm směrodatná odchylka,
- hodnot, které se od aritmetického průměru nelišily o více než $\pm 2x$ směrodatná odchylka,
- hodnot, které se od aritmetického průměru nelišily o více než $\pm 10 \%$ aritmetického průměru,
- hodnot, které se od aritmetického průměru nelišily o více než $\pm 20 \%$ aritmetického průměru,
- hodnot, které se od aritmetického průměru nelišily o více než $\pm 30 \%$ aritmetického průměru.

Tab. 6. Příklad výpočtu součinitele α a výběr nejvhodnější metody hodnocení.

Smrkové dřevo suché (tlak) - Součinitel α - Hustota / hloubka vrtu Kučerovou vrtačkou												
vzorek	Kučerova vrtačka radiální směr						Kučerova vrtačka tangenciální směr					
	ϕ	$\phi \pm s_n$	$\phi \pm 2s_n$	$\phi \pm 10\%$	$\phi \pm 20\%$	$\phi \pm 30\%$	ϕ	$\phi \pm s_n$	$\phi \pm 2s_n$	$\phi \pm 10\%$	$\phi \pm 20\%$	$\phi \pm 30\%$
St11	17402	17493	17261	17261	17402	17402	15957	16058	15957	16058	15957	15957
St12	17512	17615	17512	17640	17830	17512	12268	12478	12005	12859	12005	12268
St13	16686	16828	17013	17043	17013	16686	11738	11768	11738	11488	11779	11738
St14	14675	15136	14436	15136	14436	14675	14121	14429	14553	14320	14553	14553
St21	16277	16515	16539	16515	16539	16277	14685	15252	15054	14777	15405	15054
St22	16174	16052	16452	16319	16452	16174	15938	15813	15938	15980	15938	15938
St23	17582	17463	17377	17527	17582	17582	16748	16547	16748	17039	16748	16748
St24	17738	17778	17890	17890	17738	17738	14836	15087	14836	14577	15023	15218
St31	19742	19993	20044	19742	19742	19742	18603	18817	18864	18864	18603	18603
St32	17582	17872	17936	17817	17936	17582	18180	18669	18669	18549	18669	18669
St33	18997	19339	19388	19339	19388	18997	19161	19286	19161	19161	19161	19161
St34	18652	18800	18652	18652	18652	18652	16773	16821	16941	16941	16773	16773
St41	17155	16955	17155	17155	17155	17155	17300	17692	17300	17499	17300	17300
St42	17750	17857	17920	18094	17750	17750	17140	17410	17165	17410	17165	17140
St43	17441	17512	17599	17599	17441	17441	17441	17512	17599	17599	17441	17441
$\phi \alpha$	17424	17547	17545	17582	17537	17424	16059	16243	16169	16208	16168	16171
min	14675	15136	14436	15136	14436	14675	11738	11768	11738	11488	11779	11738
max	19742	19993	20044	19742	19742	19742	19161	19286	19161	19161	19161	19161
rozdíl	5067	4857	5608	4606	5306	5067	7423	7519	7423	7674	7382	7423
rozdíl %	25,664	24,294	27,978	23,330	26,877	25,664	38,741	38,985	38,741	40,047	38,528	38,741
r	-0,914	-0,900	-0,911	-0,916	-0,910	-0,914	-0,904	-0,900	-0,898	-0,892	-0,903	-0,905

Výsledky všech vypočítaných aritmetických průměrů jednotlivých vzorků byly zaznamenány do tabulek. Tyto tabulky byly výchozí pro získání součinitele α pro přepočet výsledků nedestruktivních zkoušek. Výpočet součinitele α byl proveden podle vzorce (15)

pro přepočet mezi pevností a hloubkou vpichu kladívkem Pilodyn nebo hloubkou vrtu Kučerovou vrtačkou. Následně byly vypočítány aritmetický průměr součinitelů α , minimální a maximální hodnota součinitele α a jejich rozdíl jak je ukázáno v tabulce (Tab. 6.), (veškeré ostatní tabulky pro výpočet součinitele α jsou uvedeny v přílohách č. 9. – č. 15.). Stejným postupem byly vypočítány součinitele α a korelační součinitele pro všechny hledané závislosti:

- hloubky vpichu kladívkem Pilodyn ve směru tangenciálním na hustotu dřeva,
- hloubky vpichu kladívkem Pilodyn ve směru radiálním na hustotu dřeva,
- hloubky vpichu kladívkem Pilodyn ve směru tangenciálním na pevnost v ohybu,
- hloubky vpichu kladívkem Pilodyn ve směru radiálním na pevnost v ohybu,
- hloubky vpichu kladívkem Pilodyn ve směru tangenciálním na pevnost v tlaku,
- hloubky vpichu kladívkem Pilodyn ve směru radiálním na pevnost v tlaku,
- hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou ve směru tangenciálním na hustotu dřeva,
- hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou ve směru radiálním na hustotu dřeva,
- hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou ve směru tangenciálním na pevnost v ohybu,
- hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou ve směru radiálním na pevnost v ohybu,
- hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou ve směru tangenciálním na pevnost v tlaku,
- hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou ve směru radiálním na pevnost v tlaku.

Nejmenší rozdíl součinitelů α vystihuje nejpřesnější metodu hodnocení. Zároveň lze přesnost metody vystihnout také hodnotou korelačního součinitele. Proto byly vybrány vždy 2 nejpříznivější metody podle rozdílu maxima a minima součinitele α a 2 nejpříznivější metody podle hodnoty korelačního součinitele. Vybrána byla metoda, která byla nejčastěji zvolena jako jedna ze dvou nejpříznivějších. Každé ze dvou nejpříznivějších metod byla přiřazena číslice 1 a celkový součet pak dal počet případů, ve kterých byla metoda zvolena jako nejpříznivější. Tímto způsobem byly vybrány 2 nejvhodnější metody hodnocení pro zkoušení Pilodynem (Tab. 7.) a 2 nejvhodnější metody hodnocení pro zkoušení Kučerovou vrtačkou (Tab. 8.). Podrobnější tabulky pro výběr nejvhodnější metody hodnocení jsou uvedeny v příloze č. 16.

Tab. 7. Výběr nejvhodnější metody hodnocení pro hloubku vpichu kladívkem Pilodyn

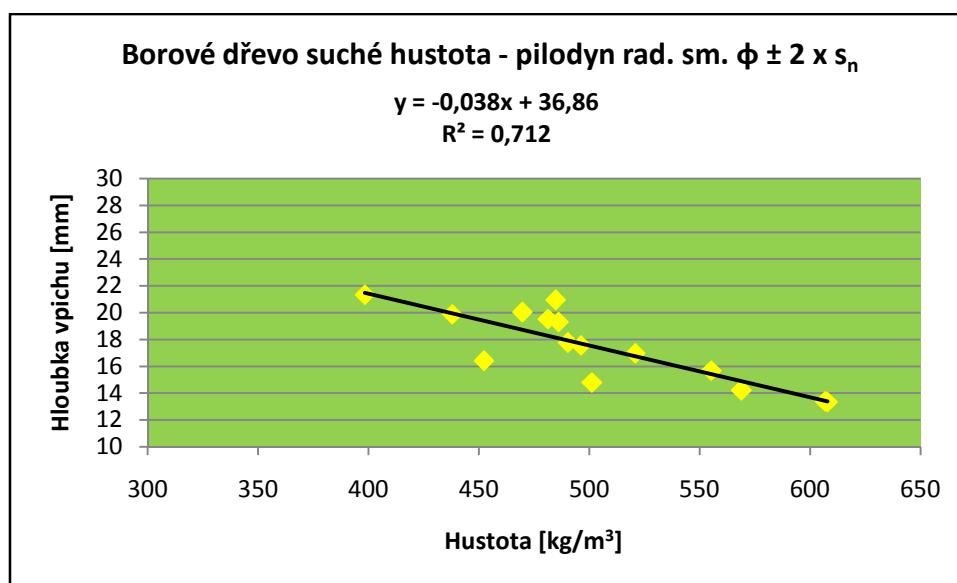
Vyhodnocení nejvhodnější metody hodnocení pro hloubku vpichu kladívkem Pilodyn												
	Pilodyn radiální směr						Pilodyn tangenciální směr					
	ϕ	$\phi \pm s_n$	$\phi \pm 2s_n$	$\phi \pm 10\%$	$\phi \pm 20\%$	$\phi \pm 30\%$	ϕ	$\phi \pm s_n$	$\phi \pm 2s_n$	$\phi \pm 10\%$	$\phi \pm 20\%$	$\phi \pm 30\%$
suma korelace	10	4	11	13	6	5	8	11	8	13	3	5
suma odchylka α	10	5	12	10	7	10	14	9	8	14	9	11
suma celkem	20	9	23	23	13	15	22	20	16	27	12	16

Tab. 8. Výběr nejvhodnější metody hodnocení pro hloubku vrtu Kučerovou vrtačkou

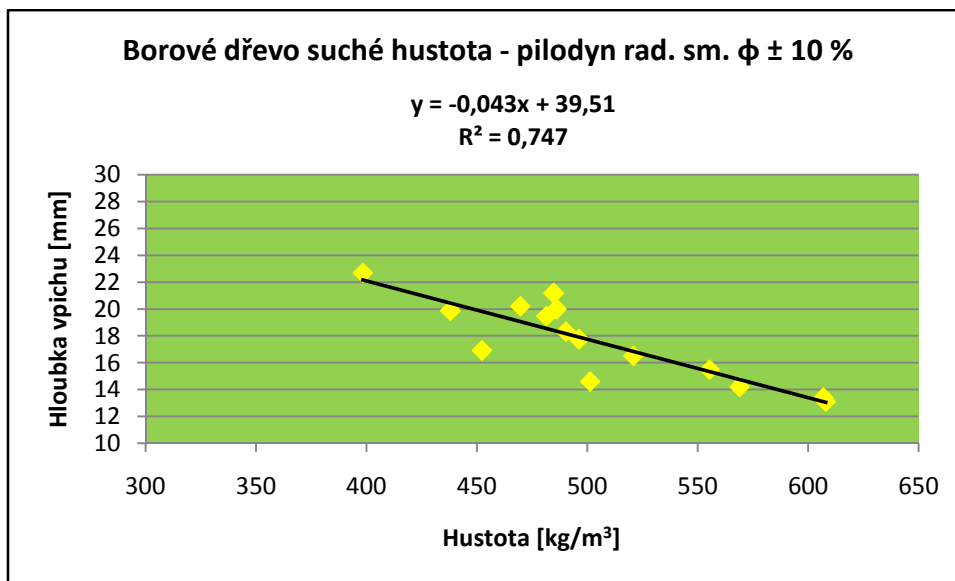
Vyhodnocení nejvhodnější metody hodnocení pro hloubku vrtu Kučerovou vrtačkou												
	Kučerova vrtačka radiální směr						Kučerova vrtačka tangenciální směr					
	ϕ	$\phi \pm s_n$	$\phi \pm 2s_n$	$\phi \pm 10\%$	$\phi \pm 20\%$	$\phi \pm 30\%$	ϕ	$\phi \pm s_n$	$\phi \pm 2s_n$	$\phi \pm 10\%$	$\phi \pm 20\%$	$\phi \pm 30\%$
suma korelace	9	8	7	13	4	8	9	10	7	9	10	4
suma odchylka α	14	5	9	12	5	11	14	8	10	9	8	10
suma celkem	23	13	16	25	9	19	23	18	17	18	18	14

Pro hodnocení výsledků zkoušky pomocí kladívka Pilodyn byly vybrány jako nejvhodnější metody hodnocení:

- aritmetický průměr hodnot, které se od aritmetického průměru neliší o více než $\pm 2x$ směrodatná odchylka,
- aritmetický průměr hodnot, které se od aritmetického průměru neliší o více než $\pm 10\%$ aritmetického průměru.



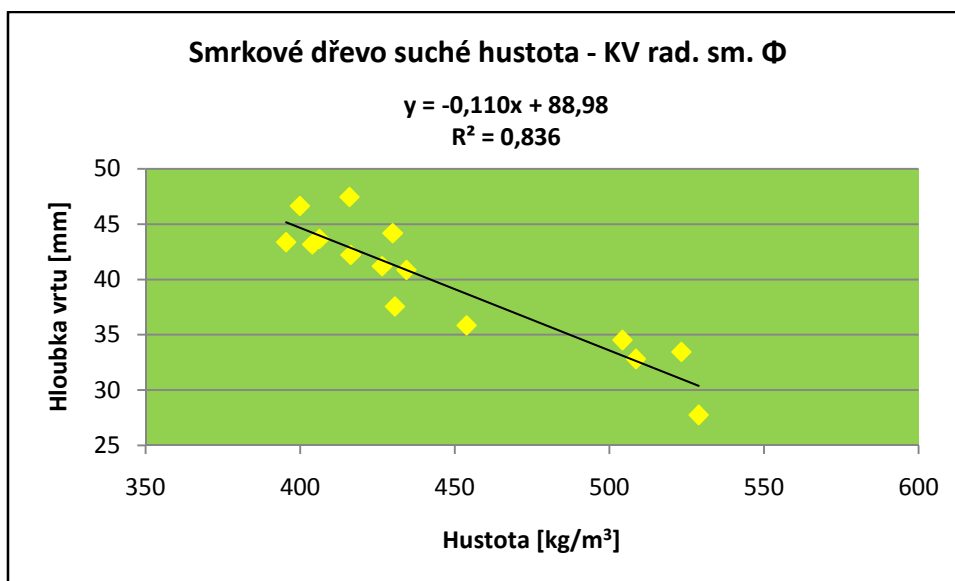
Obr. 30. Graf závislosti mezi hustotou a hloubkou vpichu kladívkem Pilodyn – $\Phi \pm 2 \times s_n$.



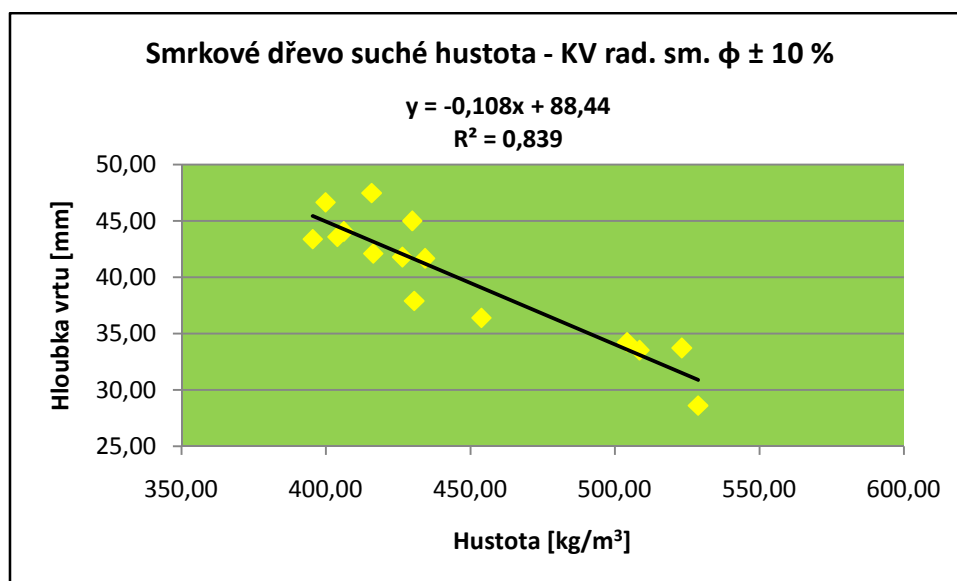
Obr. 31. Graf závislosti mezi hustotou a hloubkou vpichu kladívkem Pilodyn – $\Phi \pm 10 \%$.

Pro hodnocení výsledků zkoušky pomocí Kučerovy vrtačky byly vybrány jako nejvhodnější metody hodnocení:

- aritmetický průměr všech naměřených hodnot,
- aritmetický průměr hodnot, které se od aritmetického průměru neliší o více než $\pm 10 \%$ aritmetického průměru.



Obr. 32. Graf závislosti mezi hloubkou vrtu Kučerovou vrtačkou – Φ .



Obr. 33. Graf závislosti mezi hloubkou vrtu Kučerovou vrtačkou - $\Phi \pm 10 \%$.

Pro každou ze dvou vybraných metod pro hodnocení výsledků zkoušky pomocí kladívka Pilodyn a Kučerovy vrtačky byla vypočítána zpětná kontrola přepočtu pomocí stanoveného součinitele α (Tab. 9). Výsledky byly zhodnoceny podle procentuálního rozdílu hodnot naměřených destruktivně a vypočítaných pomocí součinitele α . Následně byla vybrána vždy jedna nejvhodnější metoda pro každou zkoušku (Tab. 10.). Protože hodnoty naměřené semidestruktivně v radiálním směru korelovaly s výsledky destruktivních zkoušek mnohem lépe než hodnoty naměřené ve směru tangenciálním, dále byla vhodnost posuzována již jen podle výsledků naměřených v radiálním směru. Výběr byl proveden stejným způsobem, jakým byly vybrány 2 nejvhodnější metody pro každou ze zkoušek.

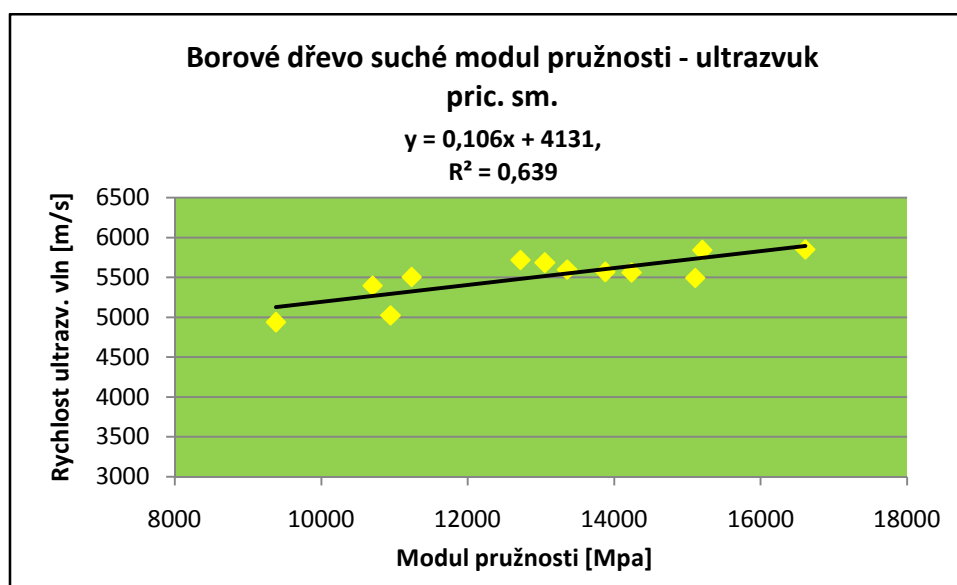
Tab. 9. Kontrola zvolených metod zpětným přepočítáním.

Kontrola zvolených metod pro hloubku vrtu Kučerovou vrtačkou									
vzorek	ρ [kg/m ³]	radiální směr				tangenciální směr			
		α / ϕ	$\alpha / (\pm 10\%)$	odchylka (ϕ)	odchylka ($\pm 10\%$)	α / ϕ	$\alpha / (\pm 10\%)$	odchylka (ϕ)	odchylka ($\pm 10\%$)
SQ4	427,91	408,31	408,75	4,58%	4,48%	422,42	421,19	1,28%	1,57%
SG3	412,39	390,47	389,46	5,32%	5,56%	362,04	362,70	12,21%	12,05%
SE3	447,02	454,25	453,30	-1,62%	-1,41%	465,69	468,26	-4,18%	-4,75%
SC3	590,08	687,19	693,78	-16,46%	-17,57%	611,60	605,97	-3,65%	-2,69%
SJ5	421,07	419,51	414,26	0,37%	1,62%	413,68	417,72	1,75%	0,80%
SK3	430,14	403,37	403,12	6,22%	6,28%	387,79	381,85	9,85%	11,23%
SA2	489,60	509,20	515,57	-4,00%	-5,30%	500,37	501,91	-2,20%	-2,51%
SM2	394,14	400,98	411,33	-1,73%	-4,36%	428,59	425,25	-8,74%	-7,89%
SL3	436,52	433,63	430,14	0,66%	1,46%	419,83	423,89	3,82%	2,89%
SF2	428,33	419,81	422,43	1,99%	1,38%	436,25	431,13	-1,85%	-0,65%
SD3	517,32	457,48	457,78	11,57%	11,51%	465,69	468,26	9,98%	9,48%
SB1	509,63	627,87	612,08	-23,20%	-20,10%	607,84	608,82	-19,27%	-19,46%
SR1	387,24	399,49	400,07	-3,16%	-3,31%	410,93	408,45	-6,12%	-5,48%
SM5	423,13	453,17	446,30	-7,10%	-5,48%	502,49	510,18	-18,76%	-20,57%
SO5	440,92	378,14	380,53	14,24%	13,70%	385,86	387,04	12,49%	12,22%
suma				-12,33%	-11,55%				
max odchylka				14,24%	13,70%				
min odchylka				-23,20%	-20,10%				

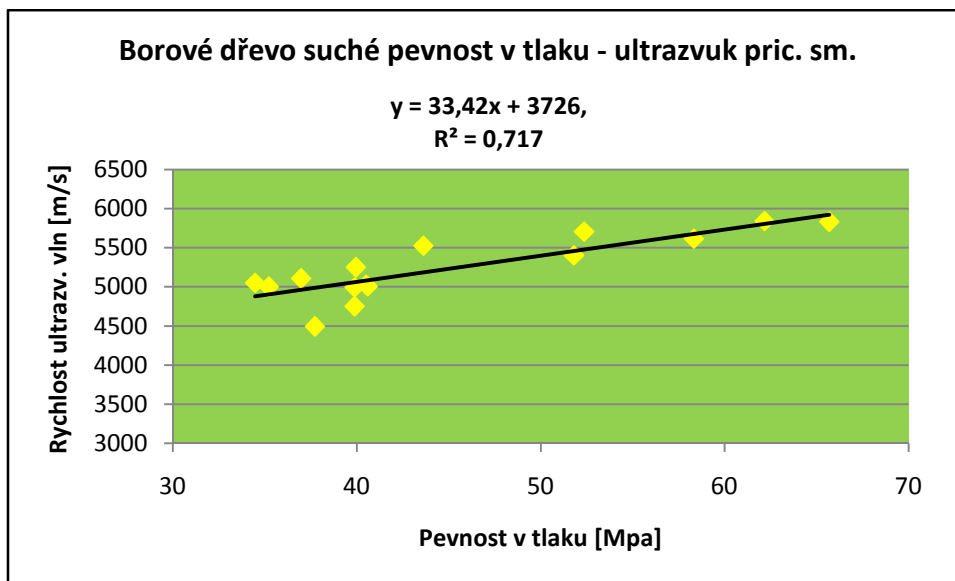
Tab. 10. Výběr nejvhodnější metody.

hustota	Pilodyn rad. sm.		KV rad. sm.		pevnost	Pilodyn rad. sm.		KV rad. sm.	
	$\alpha / (\pm 2s_n)$	$\alpha / (\pm 10\%)$	ϕ	$\phi \pm 10\%$		$\alpha / (\pm 2s_n)$	$\alpha / (\pm 10\%)$	ϕ	$\phi \pm 10\%$
boro suché ohyb	1			1	boro suché ohyb		1	1	
boro suche tlak	1		1		boro suche tlak		1	1	
boro cykly ohyb	1			1	boro cykly ohyb	1			1
boro cykly tlak	1		1		boro cykly tlak	1			1
smrk suché ohyb		1		1	smrk suché ohyb		1	1	
smrk suché tlak	1			1	smrk suché tlak		1		1
smrk cykly ohyb		1	1		smrk cykly ohyb		1	1	
smrk cykly tlak		1	1		smrk cykly tlak		1	1	
smrk staré S10 ohyb	1			1	smrk staré S10 ohyb	1			1
smrk staré S10 tlak		1		1	smrk staré S10 tlak		1	1	
smrk staré S7 ohyb		1	1		smrk staré S7 ohyb		1		1
smrk staré S7 tlak	1			1	smrk staré S7 tlak		1		1
suma	7	5	5	7	suma	3	9	6	6

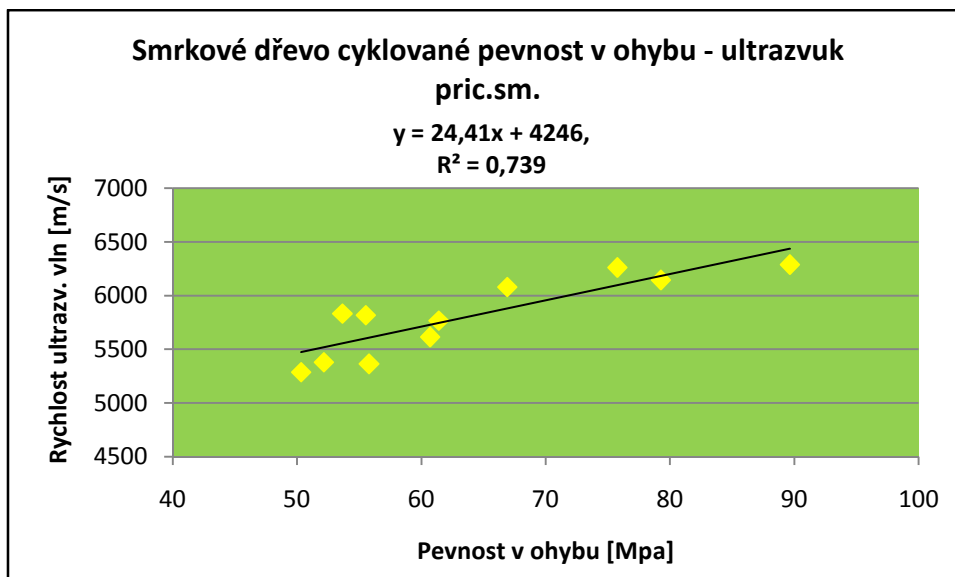
Závislosti mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou a mechanicko-fyzikálními vlastnostmi dřeva byly taktéž vyjádřeny pomocí součinitele korelace a proložením přímky metodou nejmenších čtverců. Zjišťována byla závislost rychlosti šíření ultrazvukových vln na hustotě, pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny, pevnosti v ohybu a na modulu pružnosti v ohybu. Výsledky měření na jednotlivých vzorcích byly stanoveny jako aritmetický průměr všech naměřených hodnot z důvodů nízkého počtu měření provedených na jednotlivých vzorcích. Součinitel α pro přepočet mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou a pevností nebo modulem pružnosti byl vypočten podle vzorce (16). Podle hodnot součinitelů korelace bylo zjištěno, že s hustotou dřeva, s pevností dřeva v tlaku i v ohybu a s modulem pružnosti dřeva nejlépe koreluje rychlost šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou naměřená ve směru rovnoběžně s vlákny. Korelace rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou s hustotou byla u všech zkoušených souborů velmi nízká.



Obr. 34. Graf závislosti mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a modulem pružnosti.



Obr. 35. Graf závislosti mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a pevností v tlaku.



Obr. 36. Graf závislosti mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a pevností v ohybu.

5.3. Sestavení převodních tabulek

Jak je vidět z tabulek (Tab. 9. a 10.), jako nejvhodnější metoda pro hodnocení zkoušky pomocí kladívka Pilodyn se ukázala metoda, kdy z naměřených hodnot vyloučíme ty, které se liší o více než 10 % od aritmetického průměru všech naměřených hodnot. Stejná metoda hodnocení byla vybrána jako nejvhodnější také pro hodnocení zkoušky Kučerovou vrtačkou.

Převodní tabulky byly vypočítány z průměrů součinitelů α jejichž odchylka nepřesáhla $\pm 30 \%$ u pevností dřeva v tlaku a v ohybu a modulu pružnosti a $\pm 20 \%$ u hustoty dřeva. Do průměru nebyly zahrnuty soubory, u nichž dosáhly maximální odchylky vyšších hodnot. Ve většině případů se jednalo o soubory dřeva cyklovaného. Důvodem, zejména u dřeva borového by mohl být zvýšený obsah pryskyřice, která se při procesu zetařování dřeva cyklováním několikrát opakovaně roztavila a „vylila“ na povrch i do pórů vzorku, kde ztuhla a vytvořila tak tvrdší strukturu. To pak mohlo mít větší vliv na hloubku vpichu kladívkem Pilodyn a hloubku vrtu Kučerovou vrtačkou než na pevnost, která byla zjištěna destruktivně a v důsledku toho byl vypočítán součinitel α zatížen velkou chybou.

Přestože převodní vztah pro přepočet hloubky vpichu kladívkem Pilodyn na hustotu dřeva dobře vystihuje regresní rovnice (17) [14], byla i pro tuto zkoušku sestavena převodní tabulka, aby bylo možné srovnat tuto metodu s metodou stanovení hustoty na základě vrtatelnosti dřeva pomocí Kučerovy vrtačky.

$$\rho_{12} = -0,027102t_{p,12} + 0,727987 \quad [kg / m^3] \quad (17)$$

kde ρ_{12} je hustota dřeva při vlhkosti 12% v g/cm^3
 $t_{p,12}$ je hloubka vpichu Pilodynem při vlhkosti dřeva 12% v mm

Tab. 11. Součinitele α pro semidestruktivní zkoušky borového dřeva.

	Borové dřevo - Pilodyn		Borové dřevo - KV	
zjišťovaná vlastnost	součinitel α	max. odchylka	součinitel α	max. odchylka
pevnost v tlaku	709	$\pm 30 \%$	1436	$\pm 30 \%$
pevnost v ohybu	1006	$\pm 30 \%$	1974	$\pm 30 \%$
hustota	8507	$\pm 20 \%$	15289	$\pm 20 \%$

Tab. 12. Součinitele α pro semidestruktivní zkoušky smrkového dřeva.

	Smrkové dřevo - Pilodyn		Smrkové dřevo - KV	
zjišťovaná vlastnost	součinitel α	max. odchylka	součinitel α	max. odchylka
pevnost v tlaku	458	$\pm 30 \%$	890	$\pm 30 \%$
pevnost v ohybu	755	$\pm 30 \%$	1470	$\pm 30 \%$
hustota	6795	$\pm 20 \%$	13880	$\pm 20 \%$

Tab. 13. Součinitele α pro nedestruktivní zkoušky borového dřeva.

	Borové dřevo - Ultrazvuk	
zjišťovaná vlastnost	součinitel α	max. odchylka
pevnost v tlaku	0,009	± 30 %
pevnost v ohybu	0,014	± 30 %
modul pružnosti v ohybu	2,355	± 30 %

Tab. 14. Součinitele α pro nedestruktivní zkoušky smrkového dřeva.

	Smrkové dřevo - Ultrazvuk	
zjišťovaná vlastnost	součinitel α	max. odchylka
pevnost v tlaku	0,006	± 30 %
pevnost v ohybu	0,010	± 30 %
modul pružnosti v ohybu	1,896	± 30 %

Tab. 15. Převodní tabulka pro semidestruktivní metody – dřevo smrkové.

Dřevo smrkové							
Hloubku vpichu Pilodynem				Hloubku vrtu Kučerovou vrtačkou			
hloubka vpichu $t_{p,12}$ [mm]	pevnost v tlaku $f_{c,0,12}$ [Mpa]	pevnost v ohybu $f_{m,12}$ [Mpa]	hustota ρ_{12} [kg/m ³]	hloubka vrtu t_v [mm]	pevnost v tlaku $f_{c,0}$ [Mpa]	pevnost v ohybu f_m [Mpa]	hustota ρ [kg/m ³]
10	45,8	75,5	680	15	59,3	98,0	925
11	41,6	68,6	618	16	55,6	91,9	868
12	38,2	62,9	566	17	52,4	86,5	816
13	35,2	58,1	523	18	49,4	81,7	771
14	32,7	53,9	485	19	46,8	77,4	731
15	30,5	50,3	453	20	44,5	73,5	694
16	28,6	47,2	425	21	42,4	70,0	661
17	26,9	44,4	400	22	40,5	66,8	631
18	25,4	41,9	378	23	38,7	63,9	603
19	24,1	39,7	358	24	37,1	61,3	578
20	22,9	37,8	340	25	35,6	58,8	555
21	21,8	36,0	324	26	34,2	56,5	534
22	20,8	34,3	309	27	33,0	54,4	514
23	19,9	32,8	295	28	31,8	52,5	496
24	19,1	31,5	283	29	30,7	50,7	479
25	18,3	30,2	272	30	29,7	49,0	463
26	17,6	29,0	261	31	28,7	47,4	448
27	17,0	28,0	252	32	27,8	45,9	434
28	16,4	27,0	243	33	27,0	44,5	421
29	15,8	26,0	234	34	26,2	43,2	408
30	15,3	25,2	227	35	25,4	42,0	397
31	14,8	24,4	219	36	24,7	40,8	386
32	14,3	23,6	212	37	24,1	39,7	375
33	13,9	22,9	206	38	23,4	38,7	365
34	13,5	22,2	200	39	22,8	37,7	356
35	13,1	21,6	194	40	22,3	36,8	347
36	12,7	21,0	189	41	21,7	35,9	339
37	12,4	20,4	184	42	21,2	35,0	330
38	12,1	19,9	179	43	20,7	34,2	323
39	11,7	19,4	174	44	20,2	33,4	315
40	11,5	18,9	170	45	19,8	32,7	308
				46	19,3	32,0	302
				47	18,9	31,3	295
				48	18,5	30,6	289
				49	18,2	30,0	283
				50	17,8	29,4	278

Tab. 16. Převodní tabulka pro semidestruktivní metody – dřevo borové.

Borové dřevo							
Hloubku vpichu Pilodynem				Hloubku vrtu Kučerovou vrtačkou			
hloubka vpichu $t_{p,12}$ [mm]	pevnost v tlaku $f_{c,0,12}$ [Mpa]	pevnost v ohybu $f_{m,12}$ [Mpa]	hustota ρ_{12} [kg/m ³]	hloubka vrtu t_v [mm]	pevnost v tlaku $f_{c,0}$ [Mpa]	pevnost v ohybu f_m [Mpa]	hustota ρ [kg/m ³]
10	70,9	100,6	851	15	95,7	131,6	1019
11	64,5	91,5	773	16	89,8	123,4	956
12	59,1	83,8	709	17	84,5	116,1	899
13	54,5	77,4	654	18	79,8	109,7	849
14	50,6	71,9	608	19	75,6	103,9	805
15	47,3	67,1	567	20	71,8	98,7	764
16	44,3	62,9	532	21	68,4	94,0	728
17	41,7	59,2	500	22	65,3	89,7	695
18	39,4	55,9	473	23	62,4	85,8	665
19	37,3	52,9	448	24	59,8	82,3	637
20	35,5	50,3	425	25	57,4	79,0	612
21	33,8	47,9	405	26	55,2	75,9	588
22	32,2	45,7	387	27	53,2	73,1	566
23	30,8	43,7	370	28	51,3	70,5	546
24	29,5	41,9	354	29	49,5	68,1	527
25	28,4	40,2	340	30	47,9	65,8	510
26	27,3	38,7	327	31	46,3	63,7	493
27	26,3	37,3	315	32	44,9	61,7	478
28	25,3	35,9	304	33	43,5	59,8	463
29	24,4	34,7	293	34	42,2	58,1	450
30	23,6	33,5	284	35	41,0	56,4	437
31	22,9	32,5	274	36	39,9	54,8	425
32	22,2	31,4	266	37	38,8	53,4	413
33	21,5	30,5	258	38	37,8	51,9	402
34	20,9	29,6	250	39	36,8	50,6	392
35	20,3	28,7	243	40	35,9	49,4	382
36	19,7	27,9	236	41	35,0	48,1	373
37	19,2	27,2	230	42	34,2	47,0	364
38	18,7	26,5	224	43	33,4	45,9	356
39	18,2	25,8	218	44	32,6	44,9	347
40	17,7	25,2	213	45	31,9	43,9	340
				46	31,2	42,9	332
				47	30,6	42,0	325
				48	29,9	41,1	319
				49	29,3	40,3	312
				50	28,7	39,5	306

Tab. 17. Převodní tabulka pro nedestruktivní metodu – dřevo smrkové a borové.

Smrkové dřevo				Borové dřevo			
Rychlost šíření ultrazvukových vln				Rychlost šíření ultrazvukových vln			
rychlost v [m/s]	pevnost v tlaku $f_{c,0}$ [Mpa]	pevnost v ohybu f_m [Mpa]	modul pružnosti $E_{m,g}$ [MPa]	rychlost v [m/s]	pevnost v tlaku $f_{c,0}$ [Mpa]	pevnost v ohybu f_m [Mpa]	modul pružnosti $E_{m,g}$ [MPa]
3500	21,0	35,0	6636	3500	31,5	49,0	8243
3550	21,3	35,5	6731	3550	32,0	49,7	8360
3600	21,6	36,0	6826	3600	32,4	50,4	8478
3650	21,9	36,5	6920	3650	32,9	51,1	8596
3700	22,2	37,0	7015	3700	33,3	51,8	8714
3750	22,5	37,5	7110	3750	33,8	52,5	8831
3800	22,8	38,0	7205	3800	34,2	53,2	8949
3850	23,1	38,5	7300	3850	34,7	53,9	9067
3900	23,4	39,0	7394	3900	35,1	54,6	9185
3950	23,7	39,5	7489	3950	35,6	55,3	9302
4000	24,0	40,0	7584	4000	36,0	56,0	9420
4050	24,3	40,5	7679	4050	36,5	56,7	9538
4100	24,6	41,0	7774	4100	36,9	57,4	9656
4150	24,9	41,5	7868	4150	37,4	58,1	9773
4200	25,2	42,0	7963	4200	37,8	58,8	9891
4250	25,5	42,5	8058	4250	38,3	59,5	10009
4300	25,8	43,0	8153	4300	38,7	60,2	10127
4350	26,1	43,5	8248	4350	39,2	60,9	10244
4400	26,4	44,0	8342	4400	39,6	61,6	10362
4450	26,7	44,5	8437	4450	40,1	62,3	10480
4500	27,0	45,0	8532	4500	40,5	63,0	10598
4550	27,3	45,5	8627	4550	41,0	63,7	10715
4600	27,6	46,0	8722	4600	41,4	64,4	10833
4650	27,9	46,5	8816	4650	41,9	65,1	10951
4700	28,2	47,0	8911	4700	42,3	65,8	11069
4750	28,5	47,5	9006	4750	42,8	66,5	11186
4800	28,8	48,0	9101	4800	43,2	67,2	11304
4850	29,1	48,5	9196	4850	43,7	67,9	11422
4900	29,4	49,0	9290	4900	44,1	68,6	11540
4950	29,7	49,5	9385	4950	44,6	69,3	11657
5000	30,0	50,0	9480	5000	45,0	70,0	11775
5050	30,3	50,5	9575	5050	45,5	70,7	11893
5100	30,6	51,0	9670	5100	45,9	71,4	12011
5150	30,9	51,5	9764	5150	46,4	72,1	12128
5200	31,2	52,0	9859	5200	46,8	72,8	12246
5250	31,5	52,5	9954	5250	47,3	73,5	12364
5300	31,8	53,0	10049	5300	47,7	74,2	12482

5350	32,1	53,5	10144	5350	48,2	74,9	12599
5400	32,4	54,0	10238	5400	48,6	75,6	12717
5450	32,7	54,5	10333	5450	49,1	76,3	12835
5500	33,0	55,0	10428	5500	49,5	77,0	12953
5550	33,3	55,5	10523	5550	50,0	77,7	13070
5600	33,6	56,0	10618	5600	50,4	78,4	13188
5650	33,9	56,5	10712	5650	50,9	79,1	13306
5700	34,2	57,0	10807	5700	51,3	79,8	13424
5750	34,5	57,5	10902	5750	51,8	80,5	13541
5800	34,8	58,0	10997	5800	52,2	81,2	13659
5850	35,1	58,5	11092	5850	52,7	81,9	13777
5900	35,4	59,0	11186	5900	53,1	82,6	13895
5950	35,7	59,5	11281	5950	53,6	83,3	14012
6000	36,0	60,0	11376	6000	54,0	84,0	14130
6050	36,3	60,5	11471	6050	54,5	84,7	14248
6100	36,6	61,0	11566	6100	54,9	85,4	14366
6150	36,9	61,5	11660	6150	55,4	86,1	14483
6200	37,2	62,0	11755	6200	55,8	86,8	14601
6250	37,5	62,5	11850	6250	56,3	87,5	14719
6300	37,8	63,0	11945	6300	56,7	88,2	14837
6350	38,1	63,5	12040	6350	57,2	88,9	14954
6400	38,4	64,0	12134	6400	57,6	89,6	15072
6450	38,7	64,5	12229	6450	58,1	90,3	15190
6500	39,0	65,0	12324	6500	58,5	91,0	15308

5.4. Doporučený postup zkoušení semidestruktivní metodou pomocí Kučerovy vrtačky

Protože na provádění a hodnocení měření Kučerovou vrtačkou se nevztahují žádné normativní postupy, byla v rámci zjišťování možnosti použitelnosti Kučerovy vrtačky jako semidestruktivní metody ke zjišťování mechanicko-fyzikálních vlastností sepsána doporučení pro postup zkoušení a hodnocení výsledků.

5.4.1. Postup provádění měření

- zkušební místa na zkoušeném prvku volíme v místě nejmenšího namáhání (u prvků namáhaných ohybem v místě nejmenšího ohybového momentu)

- zkušební místa volíme tak, aby byly vrty na zkoušeném prvku rozmístěny rovnoměrně
- místa vrtů volíme minimálně 20 mm od hrany prvku
- na šířku prvku volíme 2 maximálně 3 vrty vedle sebe (v závislosti na rozměru prvku), takovým způsobem, aby byla dodržena min vzdálenost 10 mm mezi jednotlivými vrty
- po délce prvku umísťujeme jednotlivé vrty ve vzdálenostech 100 – 150 mm, aby byly zjištěny vlastnosti po celém průřezu konstrukce
- zvolená místa vrtu by měla být zbavena všech vrstev nátěrů, v případě zkoušení starého dřeva by měla být odstraněná svrchní vrstvička dřeva do hl. cca 3 mm, která může být degradovaná vlivem stárnutí
- celkový minimální počet vrtů na jednom prvku jsou 3 vrty, doporučuje se však provést alespoň 12 vrtů
- před provedením každého vrtu se na Kučerově vrtačce musí nastavit stupeň vrtání „1“

5.4.2. Postup vyhodnocení měření

- při provedení 3 – 12 -ti vrtů se výsledná hloubka vrtu stanoví jako aritmetický průměr všech naměřených hodnot
- při provedení 12 -ti a více vrtů se výsledná hloubka vrtu stanoví jako aritmetický průměr hodnot, které se neliší o více než 10 % od aritmetického průměru všech naměřených hodnot
- výsledná hloubka vrtu se uvádí v mm a zaokrouhlí se na celá čísla
- pomocí převodních tabulek stanovíme z výsledné hloubky vrtu hustotu, pevnost v tlaku nebo pevnost v ohybu dřevěného prvku
- pevnosti v ohybu a tlaku uvedené v převodních tabulkách nejsou stanoveny jako charakteristické hodnoty

6. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo zjistit vzájemné vztahy mezi mechanicko-fyzikálními vlastnostmi dřeva zjištěnými pomocí destruktivních, semidestruktivních a nedestruktivních metod. V rámci praktického zkoušení v laboratoři byly provedeny destruktivní zkoušky ke zjištění pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny, pevnosti v ohybu a globálního modulu pružnosti. Ze semidestruktivních metod byla využita metoda zjištění hustoty, pevnosti v tlaku a pevnosti v ohybu pomocí měření hloubky vpichu kladívkem Pilodyn a nově vyvíjená metoda zjišťování hustoty, pevnosti v tlaku a pevnosti v ohybu pomocí měření hloubky vrtu **Kučerovou vrtačkou**. Jako nedestruktivní metoda zjišťování mechanicko-fyzikálních vlastností dřeva byla využita metoda měření rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou a následné odvození pevnosti v tlaku, pevnosti v ohybu a modulu pružnosti. Výsledkem celé práce by mělo být zhodnocení jednotlivých metod a doporučení jejich využití.

Srovnáme-li korelace hloubky vpichu kladívkem Pilodyn a hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou s hustotou dřeva, můžeme zcela jednoznačně říct, že metoda zjišťování hustoty dřeva na základě jeho vrtatelnosti dosahuje **stejných** výsledků jako metoda zjišťování hustoty pomocí kladívka Pilodyn. Pro zjišťování hustoty dřeva je tedy Kučerova vrtačka **plnohodnotnou** alternativou Pilodynu. Srovnatelné jsou i výsledky zjišťování pevností pomocí obou semidestruktivních metod. Vzhledem k tomu, že výzkum metody zjišťování vrtatelnosti pomocí Kučerovy vrtačky prokázal naprosto srovnatelné výsledky, jako metoda zjišťování hloubky vpichu pomocí kladívka Pilodyn, byl na VŠB – TUO podán a schválen **Funkční vzorek** s názvem „Diagnostické metody a zkoušení dřevěných konstrukcí“.

Vyhodnocení metody zjišťování vlastností dřeva na základě rychlosti šíření ultrazvukových vln ukázalo, že tato metoda není příliš vhodná pro zjišťování hustoty dřeva. Využití této metody je vhodné při zjišťování pevností a modulu pružnosti na základě rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou ve směru rovnoběžně s vlákny. Ve srovnání této nedestruktivní metody se zkoušenými semidestruktivními metodami (Pilodyn a Kučerova vrtačka) je metoda zjišťování pevností pomocí ultrazvuku vhodnější.

Ke zjišťování hustoty dřeva jsou tedy vhodné metody:

- stanovení hustoty dřeva na základě zjištěné hloubky vpichu kladívkem Pilodyn,
- stanovení hustoty dřeva na základě jeho vrtatelnosti pomocí Kučerovy vrtačky.

Ke zjišťování pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny je vhodná metoda:

- zjišťování pevnosti na základě rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou.

Ke zjišťování pevnosti dřeva v ohybu jsou vhodné metody:

- zjišťování pevnosti dřeva v ohybu na základě rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou,
- zjišťování pevnosti dřeva na základě zjištěné hloubky vpichu kladívkem Pilodyn,
- zjišťování pevnosti dřeva na základě jeho vrtatelnosti pomocí Kučerovy vrtačky.

Ke zjišťování globálního modulu pružnosti v ohybu je vhodná metoda:

- zjišťování modulu pružnosti na základě rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou.

Tímto výzkumem byla prokázána vhodnost/nevhodnost využití jednotlivých nedestruktivních a semidestruktivních metod pro zjištění mechanicko-fyzikálních vlastností u borového a smrkového dřeva. K jednoznačnému a přesnějšímu stanovení převodních vztahů mezi výsledky nedestruktivních a semidestruktivních zkoušek a zjištěnými mechanicko-fyzikálními vlastnostmi je potřeba odzkoušet větší sadu vzorků. Zkoušený soubor by měl vystihnout co nejširší škálu mechanicko-fyzikálních vlastností. K dalšímu zkoumání se také nabízí vliv vlhkosti dřeva na hloubku vrtu Kučerovou vrtačkou.

Seznam použité literatury

- [1] Fabian, F., Horálek, V., Chmelík, V., Chodounský, J., Král, J., Křepela, J., Michálek, J., *Statistické metody řízení jakosti*, Praha, Česká společnost pro jakost, o.s., 2007.
- [2] Gandelová, L., Horáček, P., Šlezingerová, J., *Nauka o dřevě*, Brno, Mendelejova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002.
- [3] Gibilisco, S., *Statistika bez předchozích znalostí*, Brno, Computer Press, a.s., 2009.
- [4] Horáček, P., *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.*, Brno, Mendelejova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008.
- [5] Kuklík, P., *Dřevěné konstrukce*, Praha, ČVUT v Praze Fakulta stavební, 2005
- [6] Schmid, P., a kolektiv, *Základy zkušebnictví*, Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004.
- [7] Svoboda, L. a kolektiv, *Stavební hmoty*, Bratislava, JAGA Group, s.r.o., 2007

Seznam použitých norem

- [8] ČSN EN 131831 Vlhkost vzorku řeziva – Část 1: Stanovení váhovou metodou.
- [9] ČSN EN 321 Desky ze dřeva – Stanovení odolnosti proti vlhkosti zkouškou cyklováním.
- [10] ČSN EN 384 Konstrukční dřevo – Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty.
- [11] ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností.
- [12] ČSN EN 73 2824-1 Třídění dřeva podle pevnosti – Část 1: Jehličnaté řezivo.

Seznam použitých internetových odkazů

- [13] Vavarčík, H., *Anatomická stavba dřeva, Lexikon dřev*, Ústav nauky o dřevě
[online] Dostupný na:
http://wood.mendelu.cz/nod/e107_cz/nod_plugins/projects/stavba_dreva/index.htm
- [14] Kuklík, P., Vídenský, J., *Nedestruktivní vyšetřování fyzikálních a mechanických vlastností lepeného lamelového dřeva*, CIDEAS [online].
Vystaveno 26. 11. 2007 [cit. 2010-11-30] Dostupný na:
http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/4tlv/TL07CZ_2134-2.pdf
- [15] Engineering Technology Timber construction, *Sylvatestduo*, CBS – CBT
[online]. Vystaveno 5. 3. 2008 [cit. 2010-11-30] Dostupný na:
<http://www.sylvatest.com>

Seznam obrázků

Obr. 1. Struktura smrkového dřeva.	14
Obr. 2. Struktura borového dřeva.	14
Obr. 3. Základní řezy dřevem.	19
Obr. 4. Trhliny vzniklé na vzorcích smrkového a borového dřeva po cyklování.	20
Obr. 5. Fleky roztavené smoly na povrchu vzorků.	20
Obr. 6. Uložení vzorků 50x50x300 mm v mrazicím zařízení.	21
Obr. 7. Uložení vzorků ve vodě.	21
Obr. 8. Uložení vzorků 50x50x1000 mm v mrazicím zařízení.	21
Obr. 9. Uložení vzorků v sušárně.	21
Obr. 10. Přístroj na měření rychlosti šíření ultrazvukových vln TICO.	25

Obr. 11. Kalibrace přístroje TICO.....	25
Obr. 12. Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou.	25
Obr. 13. Přístroj Pilodyn J6.	26
Obr. 14. Detail ocelového razníku Pilodyn.	26
Obr. 15. Měření hloubky vniku ocelového razníku přístrojem Pilodyn.....	27
Obr. 16. Detail vniku ocelového razníku do dřevní hmoty.	27
Obr. 17. Kučerova vrtačka a posuvné měřítko k měření hloubky vrtu.	28
Obr. 18. Nástavec s vrtákem na dřevo.....	28
Obr. 19. Rozmístění vrtů na vzorku dřeva.	28
Obr. 20. Navrtané vzorky dřeva.	28
Obr. 21. Vrtání pomocí Kučerovy vrtačky.	28
Obr. 22. Detail vrtání.....	28
Obr. 23. Etalon z dubového dřeva.	29
Obr. 24. Hloubka měření vrtu posuvným měřítkem.....	29
Obr. 25. Uspořádání zkoušky pro měření pevnosti v ohybu	30
Obr. 26. Zkouška pevnosti v ohybu.....	31
Obr. 27. Detail porušení vzorku při zkoušce pevnosti v ohybu.	31
Obr. 28. Zkouška pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny.	33
Obr. 29. Detail porušení vzorku při zkoušce pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny. ..	33
Obr. 30. Graf závislosti mezi hustotou a hloubkou vpichu Pilodynem $\Phi \pm 2 \times s_n$	42
Obr. 31. Graf závislosti mezi hustotou a hloubkou vpichu Pilodynem – $\Phi \pm 10 \%$	43

Obr. 32. Graf závislosti mezi hloubkou vrtu Kučerovou vrtačkou – Φ	43
Obr. 33. Graf závislosti mezi hloubkou vrtu Kučerovou vrtačkou - $\Phi \pm 10 \%$	44
Obr. 34. Graf závislosti mezi rychlostí šíření ultrazv. vln a modulem pružnosti.....	46
Obr. 35. Graf závislosti mezi rychlostí šíření ultrazv. vln a pevností v tlaku.	47
Obr. 36. Graf závislosti mezi rychlostí šíření ultrazv. vln a pevností v ohybu.	47

Seznam tabulek

Tab. 1. Počty vzorků dřeva.....	18
Tab. 2. Počty opakování jednotlivých zkoušek na každém vzorku.....	22
Tab. 3. Příklad stanovení charakteristické pevnosti v ohybu.	31
Tab. 4. Příklad stanovení charakteristické pevnosti v tlaku.	34
Tab. 5. Charakteristické pevnosti zkoušeného dřeva.	34
Tab. 6. Příklad výpočtu součinitele α a výběr nejvhodnější metody hodnocení.	40
Tab. 7. Výběr nejvhodnější metody hodnocení pro hloubku vpichu Pilodynem	42
Tab. 8. Výběr nejvhodnější metody hodnocení pro hloubku vrtu KV	42
Tab. 9. Kontrola zvolených metod zpětným přepočítáním.	45
Tab. 10. Výběr nejvhodnější metody.	45
Tab. 11. Součinitele α pro semidestruktivní zkoušky borového dřeva.	48
Tab. 12. Součinitele α pro semidestruktivní zkoušky smrkového dřeva.....	48
Tab. 13. Součinitele α pro nedestruktivní zkoušky borového dřeva.	49
Tab. 14. Součinitele α pro nedestruktivní zkoušky smrkového dřeva.....	49

Tab. 15. Převodní tabulka pro semidestruktivní metody – dřevo smrkové.....	50
Tab. 16. Převodní tabulka pro semidestruktivní metody – dřevo borové.	51
Tab. 17. Převodní tabulka pro nedestruktivní metodu – dřevo smrkové a borové.....	52

Seznam příloh

Příloha 1.	Výsledky měření rozměrů a vážení vzorků - výpočet hustoty dřeva.
Příloha 2.	Výsledky měření a výpočet vlhkosti vzorků dřeva.
Příloha 3.	Stanovení charakteristické pevnosti v ohybu.
Příloha 4.	Stanovení charakteristické pevnosti v tlaku.
Příloha 5.	Stanovení charakteristické hodnoty globálního modulu pružnosti v ohybu.
Příloha 6.	Průměrné naměřené hodnoty hloubky vpichu kladívkem Pilodyn vypočítané různými metodami a přepočítané na 12 % vlhkost a vstupní hodnoty pro výpočet α .
Příloha 7.	Průměrné naměřené hodnoty hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou vypočítané různými metodami a vstupní hodnoty pro výpočet α .
Příloha 8.	Průměrné naměřené hodnoty rychlosti šíření ultrazvukových vln dřevní hmotou a vstupní hodnoty pro výpočet α .
Příloha 9.	Součinitele α a korelace pro vztah mezi hloubkou vpichu Pilodynem a hustotou.
Příloha 10.	Součinitele α a korelace pro vztah mezi hloubkou vrtu KV a hustotou.
Příloha 11.	Součinitele α a korelace pro vztah mezi hloubky vpichu Pilodynem a pevností v ohybu.
Příloha 12.	Součinitele α a korelace pro vztah mezi hloubky vpichu Pilodynem a pevností v tlaku.
Příloha 13.	Součinitele α a korelace pro vztah mezi hloubky vrtu KV a pevností v ohybu.
Příloha 14.	Součinitele α a korelace pro vztah mezi hloubky vrtu KV a pevností v tlaku.

- Příloha 15.** Součinitele α a součinitele korelace pro vztah mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a mechanicko-fyzikálními vlastnostmi.
- Příloha 16.** Výběr nejvhodnějších metod hodnocení.
- Příloha 17.** Kontrola součinitele α a maximální odchylky vypočtených a naměřených hodnot.
- Příloha 18.** Hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou do etalonu z dubového dřeva.
- Příloha 19.** Měření hloubky vrtu Kučerovou vrtačkou do dubového etalon.

